

L'ELETTROTECNICA

GIORNALE ED ATTI DELL'ASSOCIAZIONE ELETTROTECNICA ITALIANA
SOTTO GLI AUSPICI DEL CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE



Direttore: RENATO SAN NICOLÒ
Redattori: F. BAROZZI - R. SARTORI - G. SILVA

Consiglieri di Redazione:

A. ASTA - S. BASILE - E. BOTTANI - F. CARATI - A. CARRER - C. CASTELLANI - F. CORREGGIARI - C. COSTADONI
V. DE MARTINI - N. FALETTI - L. MAGGI - M. MAINARDIS - G. MAIONE - L. MARENESI - F. NERI - M. PARIS
G. QUILICO - R. RIGHI - F. SCILLIERI - M. SILVESTRI - F. TEDESCHI - D. TOLOMEO - S. B. TONIOLO - A. VALLINI

Proprietaria ed Editrice: ASSOCIAZIONE ELETTROTECNICA ITALIANA (AEI).
Comitato per le pubblicazioni AEI: IL PRESIDENTE GENERALE: A. M. Angelini - GLI EX PRESIDENTI GENERALI: G. Bauchiero
G. Cenzato, M. Semenza, G. Sameda - I DIRETTORI ED EX DIRETTORI DELLE RIVISTE: E. Gatti, P. Lombardi,
R. San Nicolò - IL DIRETTORE EDITORIALE: C. Redaelli.
Direzione, Redazione, Amministrazione: UFFICIO CENTRALE AEI-CEI - VIA SAN PAOLO 10, MILANO - Conto Corrente Postale
3/1189 - Telegrammi: ASSELITA - MILANO - Telefoni: 794794-798897.

S O M M A R I O

PARTE PRIMA		Pag.		Pag.
Note di redazione		314	Notizie e Informazioni	345
Articoli:			Libri e Pubblicazioni	349
Procedimenti e sistemi di raffreddamento di tipo			Dalle Riviste	352
termodinamico per macchine elettriche sta-			Notizie Sociali:	
tiche e rotanti (G. SOGNI)		315	Associazione Elettrotecnica Italiana: LXII Ri-	
Studio comparativo sul raffreddamento termo-			nione Annuale - Progetto di Programma delle	
dinamico mediante aria di grandi trasformatori			manifestazioni	359
a circolazione forzata d'olio (B. CERRETELLI) .		325	Borsa Volta	360
Proprietà elettriche dei materiali biologici (A.			Notizie delle Sezioni: Sezione Adriatica, Se-	
ZANINI)		331	zioni di Catania e di Milano, Sezione Veneta	360
Modello analogico per la ricerca automatica degli			Comitato Elettrotecnico Italiano	362
autovalori relativi ad una notevole categoria			Necrologio: Sig. Aldo Cariboni	363
di equazioni differenziali (G. BASILE)		338	Ing. Giobatta Celotti	364
Rubriche varie:			Attività delle Sezioni	364
<i>Lettere alla Redazione:</i>				
Procedimenti e sistemi di raffreddamento di				
tipo termodinamico per macchine elettriche				
statiche e rotanti (B. CERRETELLI)		344		

PARTE SECONDA	
SUNTI E SOMMARI	65 D

Abbonamento per il 1961: in Italia L. 6500, all'Estero L. 8500
Fascicoli separati: cad. in Italia L. 650, all'Estero L. 800.
I Soci dell'AEI hanno diritto di ricevere in abbonamento gratuito la rivista «L'Elettrotecnica» o, in sua vece «Alta Frequenza»; possono ricevere
entrambe le riviste con un versamento suppletivo di L. 3.000.
I Soci hanno diritto, oltre a quanto precede, allo sconto del 20% su tutte le pubblicazioni edite dall'AEI ivi compresi eventuali abbonamenti supplementari.
È vietato riprodurre articoli della presente rivista senza citarne la fonte. - Gli scritti dei singoli Autori non impegnano la Redazione e sia quelli
degli Autori sia quelli della Redazione non impegnano l'AEI. - I manoscritti non si restituiscono. - Pubblicazione mensile. - Spedizione in abbona-
mento postale gruppo III°.

NOTE DI REDAZIONE

Per la LXII Riunione Annuale

In altra parte del presente giornale i lettori troveranno esposto un programma di massima della prossima Riunione annuale che si svolgerà, come è noto, a Torino dal 17 al 24 settembre prossimo. Il nostro congresso si inserisce nel quadro delle manifestazioni che si svolgeranno nella città che fu la prima Capitale d'Italia per celebrare il centenario dell'unità politica del nostro Paese. In queste manifestazioni l'AEI può opportunamente tenere il suo posto con la sicura coscienza di avere molto attivamente ed efficacemente operato per lo sviluppo scientifico, tecnico e industriale del nostro Paese che, appena formato, ha saputo rapidamente prendere e mantenere il passo con le maggiori nazioni del mondo.

La LXII Riunione si svolgerà quindi in un clima singolarmente celebrativo che conferisce anche ad essa una particolare importanza ed attrattiva.

Il buon successo può ritenersi fin da ora assicurato sia dal lato tecnico, per le numerose e importanti Memorie presentate, sia sotto l'aspetto delle manifestazioni collaterali, come risulta dal programma che pubblichiamo.

I Colleghi della Sezione di Torino e, in prima linea l'attivissimo Presidente ing. Merlini, hanno svolto, e stanno svolgendo, una attività veramente entusiasta per predisporre l'accoglienza più lieta e festosa ai consoci, e per superare le molte e notevoli difficoltà che la organizzazione comporta, data la contemporaneità della nostra Riunione con parecchi altri congressi e raduni.

Il programma che pubblichiamo potrà subire ancora qualche ritocco che sarà comunicato a suo tempo, ma nelle sue grandi linee si può ritenere acquisito. Esso è certamente tale da costituire da solo un vero richiamo cosicché si può prevedere che la Riunione di Torino riuscirà molto numerosa: è perciò opportuno che gli interessati mandino al più presto possibile le loro adesioni.

Nuove proposte per il raffreddamento delle macchine elettriche

Nella progettazione delle macchine elettriche, sia statiche sia ruotanti, il tecnico è sempre in lotta contro i riscaldamenti e le temperature.

Nella evoluzione della tecnica si nota una continua ricerca di nuovi e più efficaci sistemi di raffreddamento e si può dire che in proposito sono stati raggiunti perfezionamenti veramente notevoli, specialmente negli ultimi anni.

Una proposta, che crediamo nuova, viene oggi prospettata da G. SOGNI; essa, in un certo senso, tende a svincolare la temperatura della macchina da quella ambiente, raffreddandola con un fluido circolante portato ad una temperatura minore della temperatura ambiente e indipendente da essa.

Il sistema, che si appoggia alla tecnica degli impianti frigoriferi, presenta indubbiamente prospettive interessanti e seducenti, specialmente per il macchinario di grande potenza, per quanto implichi naturalmente una certa maggiore complicazione di impianto. Secondo quanto viene esposto sarebbe possibile realizzare notevoli riduzioni di peso e di ingombro nel macchinario, a parità di potenza.

A conferma della convenienza del proposto sistema di raffreddamento così detto di tipo termodinamico, B. CERRETELLI sviluppa un ampio studio comparativo di tale sistema con quelli di tipo tradizionale, nei riguardi dei grandi trasformatori a circolazione forzata d'olio. Il confronto porterebbe a concludere che si possono realizzare per tale via, nelle unità di grande potenza, considerevoli vantaggi non solo nel peso e nell'ingombro, ma anche nel costo della macchina.

La soluzione proposta, che pur si presenta concettualmente semplice, non sembra essere stata fino ad ora mai avanzata; essa merita quindi di essere sottoposta all'esame e alla discussione degli specialisti e il nostro giornale apre volentieri le sue pagine ad eventuali discussioni che possano condurre a definire e precisare la portata e le possibilità del nuovo sistema.

Elettricità e biologia

L'elettricità si manifesta ogni giorno più una delle entità fisiche più diffuse ed importanti dell'universo, dalle particelle elementari della materia alla vita dei grandi astri.

Il mondo biologico non si sottrae. Fenomeni elettrici da parte di esseri viventi erano noti fin dall'antichità ma si deve alla biologia moderna l'aver messo in luce la grande importanza dell'elettricità nelle funzioni vitali degli organismi e specialmente in quelle, fisicamente più elevate, inerenti al sistema nervoso.

I progressi che si sono fatti in questo campo sono veramente meravigliosi sia per l'interesse delle nozioni acquisite, sia per le perfette e delicatissime tecniche di studio che si sono dovute sviluppare, sia infine per l'importanza pratica delle applicazioni mediche che se ne possono dedurre.

Non è fuori luogo quindi che il nostro giornale si occupi anche di questi argomenti che tengono, insieme, della biologia e dell'elettrotecnica e i nostri lettori saranno certamente grati a A. ZANINI che li informa dello stato attuale di questi studi, per quanto riguarda, almeno in generale, le proprietà elettriche dei materiali biologici.

Matematica e elettrotecnica

Queste due scienze danno un singolare esempio del reciproco aiuto che le varie branche del sapere umano possono prestarsi.

Mentre infatti l'elettrotecnica moderna non potrebbe fare a meno della matematica, essa può fornire alla matematica un potentissimo ausilio in casi particolarmente complicati e difficili: ne sono esempio le calcolatrici elettroniche e la possibilità di ricondurre questioni matematiche allo studio del comportamento di speciali circuiti elettrici.

Un caso di questo genere è illustrato oggi da G. BASILE nei riguardi della ricerca degli autovalori di una particolare categoria di equazioni differenziali.

Comitato Elettrotecnico Italiano

Segnaliamo la pubblicazione, recentemente avvenuta, della nuova edizione delle Norme per le linee elettriche aeree esterne.

LA REDAZIONE

PROCEDIMENTI E SISTEMI DI RAFFREDDAMENTO DI TIPO TERMODINAMICO PER MACCHINE ELETTRICHE STATICHE E ROTANTI

G. SOGNI (*)

Dopo avere accennato ai progressi conseguiti in questi ultimi anni nel campo dei materiali magnetici ed isolanti, cui non fanno riscontro progressi nel campo dei materiali conduttori, per i quali il rame è tuttora l'unico materiale di pratico impiego, si osserva che le qualità conduttrici del rame, come di tutti i metalli, possono essere aumentate, nelle macchine elettriche, abbassandone la temperatura di funzionamento.

Ciò porta ad introdurre nel raffreddamento delle macchine elettriche procedimenti di tipo « termodinamico », ossia effettuati per mezzo di macchine operatrici termiche, che si contrappongono ai procedimenti di tipo « ambientale » dove il fluido raffreddante viene impiegato alla temperatura ambiente.

Dopo un sommario esame dei vantaggi e degli inconvenienti che ci si possono attendere dall'introduzione del raffreddamento termodinamico, si passa alla descrizione dei dispositivi da usarsi per la sua realizzazione.

L'impiego di tali dispositivi ed i risultati che si presume di conseguire vengono chiariti con esempi di applicazione a trasformatori e turbogeneratori di grande potenza. A questo proposito si svolgono considerazioni circa le potenze limiti di macchine elettriche che, col raffreddamento termodinamico, possono essere notevolmente incrementate. Anche le potenze specifiche, ossia quelle riferite ad unità di peso o di volume della macchina, possono essere incrementate; e a questo proposito si esamina l'opportunità di applicare la refrigerazione termodinamica ai motori elettrici per la trazione ferroviaria.

L'attuale tendenza d'innalzare sempre più il livello termico di funzionamento del rame nelle macchine elettriche, lasciandolo tuttavia dipendente dal livello termico dell'ambiente in cui le macchine stesse lavorano, mentre appare pratica e logica nella gran parte di macchine usuali di limitata potenza, non appare altrettanto pratica e logica per le grandissime macchine o per macchine di speciali esigenze per le quali la moderna tecnica del raffreddamento ha escogitato le soluzioni più varie e talvolta più complesse. Il procedimento termodinamico, reso praticamente applicabile alle macchine elettriche a seguito dei progressi conseguiti dalla moderna tecnica della refrigerazione, pur costituendo in sé un elemento di un certo rilievo, può permettere vantaggi e semplificazioni tali da consigliarne l'impiego.

I. - INTRODUZIONE.

Nella fabbricazione dei materiali impiegati nell'industria elettrica sia magnetici che isolanti, si sono conseguiti in questi ultimi anni progressi importantissimi, che hanno permesso di migliorare le prestazioni delle macchine elettriche statiche e rotanti in genere, e più spiccatamente delle grandi e grandissime macchine.

Per i materiali magnetici sono stati largamente applicati i lamierini a cristalli orientati che hanno permesso di aumentare i valori dell'induzione e di ridurre le per-

dite. Nel campo dei materiali isolanti, siliconi e nuovi tipi di resine e vernici sintetiche, oltre all'impiego del vetro tessile, hanno consentito di elevare il livello della barriera termica, che, con l'impiego dei siliconi, può essere portata senza pericolo oltre i 150 °C.

Gli odierni costruttori di macchine elettriche sono tuttora alla ricerca di materiali isolanti suscettibili di poter sopportare con sicurezza temperature sempre più elevate, ed hanno già tratto da quelli disponibili risultati e deduzioni circa le attuali possibilità limiti di sfruttamento del grande macchinario elettrico.

Tali risultati e deduzioni si fondano a tutt'oggi sull'impiego del rame come materiale conduttore, poichè non si prevede prossimo l'avvento di altro metallo o lega di pratico impiego, dotato di una conducibilità elettrica superiore a quella del rame. Se di tale metallo o lega si potesse disporre, è evidente che tutto il proporzionamento funzionale e dimensionale delle macchine elettriche potrebbe essere riveduto; ed è indubbio che ulteriori decisivi vantaggi tecnici ed economici potrebbero derivarne per l'industria elettrica in genere, ed in modo particolare per le costruzioni elettromeccaniche.

Il rame raggiunge sovente nelle macchine elettriche temperature che superano i 100 °C, ed in certe condizioni ambientali e con l'impiego dei suddetti nuovi isolanti resistenti al calore, può anche superare i 150 °C. Nel proporzionare le macchine elettriche, i costruttori assumono perciò una resistività del rame $\rho_{cu} = (2,1 \div 2,6) \mu\Omega \text{ cm}$.

È però noto che la resistività del rame è proporzionale ad una certa « temperatura assoluta apparente » (v. Appendice I) propria del rame, che qui denominiamo T_{cu} , data dall'espressione:

$$T_{cu} = t + 234,5$$

dove t è la temperatura del rame in °C. Da ciò si può trarre la deduzione che un metallo di conducibilità superiore al rame potrebbe essere il rame stesso, purchè esso venga impiegato ad un livello termico inferiore a quello al quale viene oggi a trovarsi nelle macchine elettriche.

Se la temperatura ambiente anzichè variare, come avviene nei nostri climi, fra i — 10 e i + 30 °C, variasse, ad esempio, fra i — 60 ed i — 30 °C, ecco che la resistività del rame alla temperatura media ambiente verrebbe ridotta nel rapporto $(234,5 - 45) : (234,5 + 10) \cong 0,78$.

Poichè la temperatura ambiente è determinata da fattori indipendenti dalla volontà del costruttore e non prevedibili in sede di progetto, e d'altra parte le macchine elettriche debbono essere calcolate e collaudate in base a criteri unitari, e per le condizioni ambientali più gravose, è logico che le Norme dei Comitati Elettrotecnici prevedano per le macchine ed apparecchi elettrici la possibilità di funzionare regolarmente a temperature ambiente intorno ai 35 ÷ 45 °C, e prescrivano di considerare tali temperature quelle a cui i costruttori normalmente devono riferirsi per i loro progetti. Le Norme ammettono poi sopraelevazioni di temperatura per gli isolamenti delle varie classi tali da portare il livello termico del rame a limiti compresi fra i 100 ed i 150 °C, durante il funzionamento delle macchine ed apparecchi al carico normale.

(*) Dr. Ing. GIUSEPPE SOGNI - Direttore tecnico della Soc. Jupiter, Genova.

In corrispondenza a queste temperature la resistività del rame è da 2,3 a 2,6 $\mu\Omega$ cm.

Ci si pone ora il quesito:

«È possibile e conviene far funzionare il rame nelle macchine elettriche ad un livello termico più basso in modo da ridurne sensibilmente la resistività?».

2. - CONSIDERAZIONI E DEFINIZIONI SUI VARI TIPI DI RAFFREDDAMENTO.

Se si adotta, per le macchine elettriche, un tipo di raffreddamento analogo a quello impiegato per gli impianti frigoriferi, si può senz'altro rispondere affermativamente circa tale possibilità. Infatti, raffreddando la macchina elettrica con un fluido il quale circoli ad un livello termico sensibilmente più basso di quello dell'ambiente, di altrettanto si abbasserà il livello termico del rame della macchina stessa. Il calore ceduto dalla macchina elettrica al fluido refrigerante ad un livello termico inferiore a quello dell'ambiente potrà poi essere ceduto all'ambiente stesso con l'impiego di un procedimento termodinamico del tipo di quelli adottati per gli impianti frigoriferi.

Circa la convenienza di un funzionamento ad un livello termico più basso, ottenibile col procedimento ora indicato, risponde, almeno in parte, l'enunciato, di cui all'Appendice I, che qui riportiamo:

«La potenza meccanica teorica che occorre spendere per azionare una macchina operatrice termica (frigorifera), la quale abbassi ad un valore inferiore a quello dell'ambiente la temperatura in entrata di un fluido raffreddante in circuito chiuso una macchina elettrica, è più piccola della potenza che si risparmia per effetto delle minori perdite che si hanno nella macchina elettrica in conseguenza del suo funzionamento al regime termico corrispondente alla temperatura più bassa del fluido raffreddante».

Da questa enunciazione si possono poi trarre deduzioni che permettono di rispondere più direttamente al quesito. Intanto, agli effetti del rendimento, si vede che, poiché il complesso «macchina elettrica raffreddata termodinamicamente + macchina operatrice termica per il raffreddamento termodinamico della stessa» porta circa alle stesse perdite che si hanno per la sola macchina elettrica di uguali prestazioni, raffreddata nel modo convenzionale, il rendimento del suddetto complesso non è inferiore a quello della macchina convenzionale. Però nella macchina elettrica raffreddata termodinamicamente le perdite intrinseche sono minori, e si intuisce quindi come quest'ultima possa risultare di peso, ingombro e costo tanto inferiori a quelli della macchina convenzionale, da compensare largamente la spesa necessaria per l'acquisto, l'installazione e la manutenzione dell'impianto frigorifero occorrente per effettuare il raffreddamento di tipo termodinamico. Si intuisce poi che i vantaggi saranno tanto più sentiti, quanto più grande sarà la potenza della macchina elettrica considerata. A conferma di quanto ora asserito servono gli esempi riportati in seguito; possiamo però fin d'ora porre esemplari affermata circa la convenienza dell'impiego del procedimento termodinamico almeno per le macchine elettriche di grande potenza, raffreddate in circuito chiuso.

Prima di procedere ad una esemplificazione, necessariamente sommaria e teorica, di applicazione a macchine elettriche del procedimento di raffreddamento termodinamico e dei relativi dispositivi che oggi sembra possibile adottare, conviene considerare ulteriormente le caratteristiche che questo procedimento presenta, ed i risultati ottenibili, nei vari casi, con il suo razionale impiego.

Allo scopo di meglio chiarire le considerazioni che seguiranno, ci sembra opportuno fare una distinzione fra i vari procedimenti di raffreddamento adottabili per le macchine elettriche visti sotto l'aspetto più generale, che comprende anche i nuovi procedimenti di cui ci occupiamo. Le definizioni che ne conseguono hanno un carattere

limitato nell'ambito delle considerazioni svolte in questo scritto, ma, con opportune modifiche e correzioni, potranno eventualmente entrare nell'uso comune.

Sotto l'aspetto del livello termico al quale il fluido refrigerante viene impiegato per asportare il calore che si produce nella macchina elettrica durante il suo funzionamento, distinguiamo:

a) Procedimento di raffreddamento « *ambientale* », dove il fluido refrigerante viene impiegato direttamente, ossia alla temperatura dell'ambiente che lo fornisce.

b) Procedimento di raffreddamento « *termodinamico* », dove il fluido refrigerante, prima di essere impiegato, viene portato mediante una macchina operatrice termica ad una temperatura inferiore a quella dell'ambiente che lo fornisce.

Sotto l'aspetto del livello termico al quale la macchina elettrica nelle sue varie parti viene mantenuta dal fluido refrigerante durante il suo funzionamento, distinguiamo:

1) Procedimento di raffreddamento « *a efficienza costante* » dove la temperatura e la quantità del fluido refrigerante, ed il circuito di raffreddamento rimangono immutati, indipendentemente dalla temperatura ambiente e dalle condizioni di carico e di regime termico delle varie parti della macchina elettrica.

2) Procedimento di raffreddamento « *a efficienza variabile* » dove si tiene conto delle condizioni ambientali e di carico della macchina elettrica per proporzionare la temperatura e la quantità del fluido refrigerante, e stabilire il circuito di raffreddamento.

3) Procedimento di raffreddamento « *a efficienza controllata* » dove il proporzionamento, di cui al punto 2), è asservito alla temperatura di una o più parti della macchina elettrica da raffreddare, essendo l'efficienza massima del sistema di raffreddamento sufficiente a mantenere detta temperatura ad un livello prestabilito, per qualsiasi condizione di carico e di temperatura ambiente alla quale la macchina elettrica può funzionare.

È evidente che per ciascuno dei procedimenti di raffreddamento ora considerati possono adottarsi tutti i sistemi attualmente in uso, ossia quelli in circuito chiuso od in circuito aperto, ed il fluido nel quale la macchina è immersa può essere ancora l'olio, l'aria, l'idrogeno, od altro gas adatto allo scopo, usato alla pressione atmosferica od a pressioni diverse.

I procedimenti di raffreddamento attualmente in uso, per quanto a nostra conoscenza, sono esclusivamente del tipo « *ambientale* » e, generalmente « *a efficienza costante* ». Esistono, limitatamente a grandi macchine, procedimenti « *a efficienza variabile* », mentre un procedimento « *a efficienza controllata* » nel senso stretto, come definito al punto 3), non sarebbe possibile col raffreddamento del tipo ambientale, in quanto la temperatura ambiente non può essere sottoposta a controllo.

Se si adotta però il procedimento di raffreddamento termodinamico, si può per tale via realizzare anche il raffreddamento a efficienza controllata, ed arrivare a macchine elettriche dove le parti che maggiormente interessano possono essere mantenute ad una temperatura praticamente costante, comunque varino la temperatura ambiente e le condizioni di carico della macchina. Si tratta infatti di un problema che non è certo dei più difficili fra quelli che la moderna tecnica della regolazione e dei servomeccanismi è atta a risolvere.

Si prenda, ad esempio, quale segnale di riferimento la temperatura di un punto o la media di alcuni punti di un avvolgimento, allo scopo di mantenere costante questa temperatura, e si parta, ad esempio, da macchina ferma ed a regime termico. Mettendo la macchina in funzione ad una certa condizione di carico, la temperatura dell'avvolgimento, che inizialmente aveva lo stesso valore per tutta la macchina, ed uguale a quella del fluido nel quale la macchina è immersa, cresce, come noto, con legge esponenziale rispetto a quella del fluido stesso. Per-

ciò se con la stessa legge si facesse decrescere la temperatura del fluido nel quale la macchina è immersa, ciò che è teoricamente possibile col procedimento termodinamico a efficienza controllata, l'avvolgimento della macchina elettrica funzionerebbe a temperatura costante. In pratica le costanti di tempo che entrano nel problema dando luogo a ritardi e sfasamenti nell'intervento del regolatore termico, non consentirebbero di mantenere la temperatura dell'avvolgimento rigorosamente costante, ma gli spostamenti dal valore prefissato saranno quantitativamente tanto minori, quanto maggiori saranno la precisione e la velocità di risposta del sistema regolante adottato.

Tutti i costruttori e gli esercenti di grandi e grandissime macchine elettriche concordano sulla convenienza di mantenere per quanto possibile costanti le temperature degli avvolgimenti, perchè così facendo si eliminano gli effetti talvolta disastrosi della dilatazione termica del rame, che, per causa delle sollecitazioni meccaniche e dei movimenti relativi che ne conseguono, provoca nel rame stesso incrudimenti e punti di rottura, mentre i materiali isolanti vengono a loro volta sollecitati meccanicamente in guisa tale che la loro compattezza e la loro rigidità dielettrica ne risultano gravemente compromesse.

Similmente costruttori ed esercenti di macchine elettriche concordano sul fatto che, a parità di altre condizioni, una più bassa temperatura di funzionamento prolunga notevolmente l'efficienza e la durata degli isolamenti. Col raffreddamento termodinamico a efficienza controllata ci sembra che si possa raggiungere il duplice scopo di mantenere le temperature costanti e convenientemente basse. Col raffreddamento a efficienza controllata si eliminano poi gli sprechi di energia che quasi sempre si hanno nei sistemi a efficienza non controllata, in quanto la temperatura e la quantità del fluido refrigerante sono sempre commisurate alla temperatura ambiente ed alla quantità di calore che occorre asportare, la quale è funzione del carico della macchina elettrica, variabile a sua volta nel tempo con legge generalmente statistica. Per effetto delle non prevedibili variazioni del carico, l'efficienza del sistema di raffreddamento è perciò generalmente mantenuta tale da sopprimere alle condizioni più gravose, ossia alle massime temperature ambiente ed ai massimi carichi. Di conseguenza essa risulta quasi sempre eccessiva rispetto alle reali necessità della macchina elettrica, e la potenza necessaria per mantenere tale efficienza va in parte perduta.

Dopo quanto ora detto ci sembra che si possa ragionevolmente dedurre che le caratteristiche dei procedimenti di raffreddamento termodinamico si presentano, almeno in via teorica, superiori a quelle dei procedimenti ambientali. Questa superiorità appare poi più evidente ove si adotti il procedimento a efficienza controllata, inquantochè in tali casi mentre è possibile far funzionare la macchina elettrica in condizioni meccaniche ed elettriche ideali, si può anche ridurre al minimo la potenza, e quindi l'energia spesa per il raffreddamento, arrivando, in ultima analisi, ad un migliore rendimento medio complessivo.

3. - PROCEDIMENTI CHE POSSONO SEGUIRSI PER ATTUARE IL RAFFREDDAMENTO TERMODINAMICO DELLE MACCHINE ELETTRICHE.

Tutte le volte che s'introduce in un impianto un elemento nuovo, dal quale ci si propone di ottenere vantaggi economici e migliori tecniche, occorre tener conto, specialmente nei casi in cui manca una sufficiente esperienza di esercizio, dei suoi aspetti negativi. Nel nostro caso, l'aspetto negativo più importante del raffreddamento termodinamico è quello di possibili avarie che, mettendo fuori servizio per un tempo più o meno lungo l'impianto di refrigerazione, potrebbero obbligare a mettere fuori servizio la macchina elettrica da esso servita.

È ben vero che anche gli attuali sistemi di raffredda-

mento possono presentare e talvolta presentano delle avarie; ma nelle macchine raffreddate termodinamicamente, mentre non si escludono le avarie possibili coi sistemi di raffreddamento attuali, si aggiungono le nuove possibilità di avarie inerenti all'impianto di refrigerazione.

Quest'aspetto negativo dell'applicazione del raffreddamento termodinamico può essere però ovviato, se, nel procedimento ci si attiene ai criteri che esporremo.

Supponiamo, in primo luogo, che per una macchina elettrica raffreddata termodinamicamente si impieghino gli stessi fluidi e lo stesso circuito di raffreddamento della macchina elettrica a raffreddamento ambientale. Si useranno di conseguenza per il raffreddamento della macchina le stesse pompe e gli stessi ventilatori (¹); solo il livello termico dei suddetti fluidi sarà portato a valori inferiori a quello dell'ambiente, con l'impiego di macchine operatrici termiche.

Ciò premesso, prendiamo in esame la macchina elettrica ME schematizzata in fig. 1 con un rettangolo tratteggiato, e supponiamo di munirla del completo impianto occorrente per il raffreddamento ambientale. Questo, nel caso più generale, sarà costituito dall'involucro *m*, all'interno del quale circola il fluido raffreddante interno *f_i* (es. aria, idrogeno, olio ecc.) per mezzo del ventilatore, o pompa, *CI*. Il circuito del fluido *f_i*, che denominiamo « interno » si chiude attraverso lo scambiatore di calore *SI*, all'esterno del quale, delimitato dall'involucro *r*, circola il fluido raffreddante esterno *f_e* (in generale aria od acqua alla temperatura ambiente) per mezzo del ventilatore, o pompa di circolazione, *CEI*. Denominiamo « esterno » il circuito azionato da *CEI*. In questo caso generale possono essere comprese anche le macchine elettriche con conduttori direttamente raffreddati nel loro interno mediante liquidi o gas, purchè *CI* e *CEI* siano considerati come il complesso di tutti i ventilatori o pompe impiegati rispettivamente per i circuiti di raffreddamento interni ed esterni.

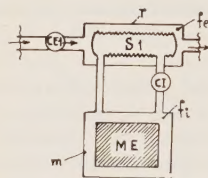


Fig. 1. — Schema di raffreddamento ambientale.

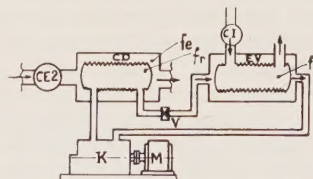


Fig. 2. — Schema di raffreddamento termodinamico.

Si consideri ora l'impianto di refrigerazione schematizzato in fig. 2. In esso *K* è un compressore azionato dal motore *M*; *CD* è il condensatore lambito dal fluido raffreddante esterno *f_e*, mosso dal ventilatore, o pompa, *CE2*; *f_r* è il fluido refrigerante che viene spinto in *CD* dal compressore *K* ed esce da *CD* attraverso la valvola d'espansione *V* per entrare nell'evaporatore *EV* che serve a refrigerare il fluido *f_i* mosso dal ventilatore, o pompa, *CI*.

Se ora combiniamo insieme i due circuiti rappresentati nelle figg. 1 e 2 con l'impiego di apposite valvole devia-

(¹) Ciò vale anche per i trasformatori solo se si considerano distinti dall'eventuale aerotermo impiegato per raffreddare l'olio.

trici, si otterrà il complesso schematizzato in fig. 3. La macchina elettrica è, in questa figura, ancora denominata con *ME*, ed è raffreddata dallo stesso fluido f_i impiegato nel procedimento ambientale. Il fluido f_i , mosso da *CI*, quando le valvole deviatrici *D1*, *D2*, si trovano nella posizione indicata in figura, anziché circolare nello scambiatore di calore *SI*, circola nell'evaporatore *EV*, e viene refrigerato per mezzo del fluido frigorifero f_r che proviene dal condensatore *CD* attraverso la valvola d'espansione *VE*. Il calore che f_r sottrae ad f_i , viene a sua volta sottratto a f_r medesimo dal fluido a temperatura ambiente f_e il quale viene fatto passare nel condensatore *CD* per mezzo del ventilatore, o pompa, *CE2*. I ventilatori, o pompe, *CE1* possono in queste condizioni restare inattivi in quanto lo scambiatore *SI* è escluso dal circuito di raffreddamento della macchina elettrica.

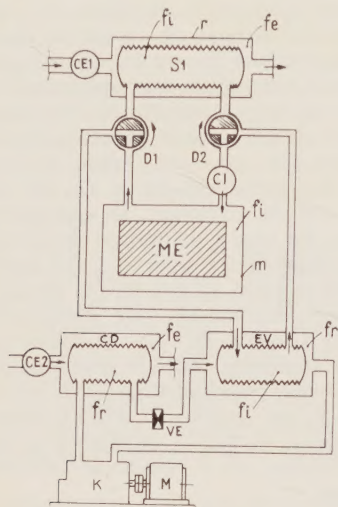


Fig. 3. — Schema di raffreddamento ambientale e termodinamico combinati.

Ruotando di 90° nel senso indicato dalle frecce le valvole deviatrici *D1* e *D2*, si inserisce invece nel circuito lo scambiatore di calore *SI* e si esclude l'impianto di refrigerazione, il quale può perciò restare inattivo. È chiaro che le condizioni in cui viene a trovarsi la macchina elettrica in questo caso sono le stesse di quelle considerate nel caso della fig. 1. Si potrà quindi provvedere al raffreddamento della macchina col raffreddamento ambientale, mettendo in funzione i ventilatori, o pompe, *CE1*. Come si vede, adottando una installazione del tipo di quella schematizzata in fig. 3, ogni aspetto negativo dell'applicazione del procedimento termodinamico, per quanto si riferisce alla sicurezza ed alla continuità del servizio della macchina elettrica, diviene ininfluente. Si ha poi il vantaggio di poter introdurre il raffreddamento termodinamico anche in macchine già installate e funzionanti, senza dover eseguire su di esse alcuna modifica, e soprattutto senza doverne interrompere il servizio se non per il brevissimo tempo occorrente per l'installazione delle valvole deviatrici *D1* e *D2*.

Nel caso di macchine elettriche aventi lo scambiatore di calore incorporato (ad esempio, turbogeneratori raffreddati in idrogeno per centrali termoelettriche), i criteri che hanno condotto allo schema di installazione della fig. 3 possono ancora essere seguiti. L'installazione dovrà però essere modificata e si potrà, ad esempio, adottare lo schema della fig. 4. In esso le valvole deviatrici *D1* e *D2* hanno il compito di far circolare nello scambiatore di calore *SI* due diversi fluidi refrigeranti, ossia il fluido f_e durante il funzionamento della macchina con raffreddamento ambientale, ed il fluido f_t durante quello con raffreddamento termodinamico. Essendo per i turbogeneratori il fluido f_e costituito da acqua, il fluido f_t potrà es-

sere una soluzione acquosa incongelandibile alla temperatura più bassa alla quale essa può venir portata nell'evaporatore *EV*. Ciò perchè durante la fase di passaggio dal raffreddamento ambientale a quello termodinamico, nell'interno dello scambiatore di calore *SI* si trova acqua, che, con la rotazione delle valvole deviatrici *D1* e *D2*, viene

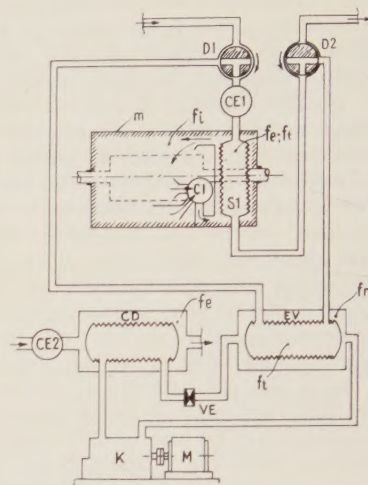


Fig. 4. — Schema di raffreddamento ambientale e termodinamico combinati per macchine con scambiatore di calore incorporato.

ad essere immessa nel circuito di refrigerazione in cui circola il fluido f_t , e si mescola con esso. Se f_t è una soluzione acquosa si ha, soltanto in questa fase, una diluizione della soluzione stessa, che può essere però facilmente riportata al grado di concentrazione richiesto.

Negli esempi di applicazione dei procedimenti per il raffreddamento termodinamico fin qui riportati, si è sempre supposto che la macchina frigorifera funzionasse con un ciclo a compressione. È noto però che esistono macchine frigorifere con ciclo ad assorbimento. Quest'ultimo, che appare a prima vista più complesso ed il cui rendimento termodinamico è inferiore per temperature di refrigerazione non molto basse, ha però il vantaggio di non richiedere l'impiego di compressori, ma solo quello di una sorgente di calore (ad esempio un serpentino riscaldato con vapore), la quale sorgente è sempre disponibile nelle centrali generatrici termiche. Si può quindi pensare che per il raffreddamento termodinamico dei turbogeneratori la macchina frigorifera più conveniente e sicura possa essere con ciclo ad assorbimento, mentre nel caso di centrali, o sottostazioni di trasformazione, dove in generale, una sorgente di calore a temperatura adeguata non è disponibile, la convenienza può essere per il ciclo a compressione.

4. - ESEMPIO DI RAFFREDDAMENTO TERMODINAMICO PER TRASFORMATORI.

L'esempio che qui riportiamo ha lo scopo di fornire una valutazione quantitativa, sia pure di larga massima dei risultati che si possono ottenere applicando la refrigerazione ai trasformatori di grande potenza. Ciò può ottenersi riportando alcuni dati tecnico-economici comparativi (naturalmente anch'essi di larga massima) per un trasformatore elevatore per centrali elettriche, trifase, a due avvolgimenti, con raffreddamento a circolazione forzata d'olio; per il quale s'impieghino in un primo caso il raffreddamento di tipo ambientale, e in un secondo caso il raffreddamento di tipo termodinamico.

Sia il trasformatore progettato nel modo usuale per una potenza di 100 MVA in servizio continuo, e si supponga di avere a disposizione per il raffreddamento acqua alla temperatura di 25 °C (v. Norme CEI, VDE, ASA, ecc.).

Il peso approssimativo del trasformatore senz'olio può valutarsi sulle 120 t, e quello dell'olio sulle 30 t. Le per-

dite a regime, a pieno carico, siano di 400 kW nel rame e 150 kW nel ferro. Sia inoltre 20 kW la potenza richiesta dai motori delle pompe di circolazione dell'olio. Il rendimento che risulta da tali perdite sarà, a pieno carico e $\cos \varphi = 0,8$ il 99,28 %.

La temperatura media del rame sia di 80 °C. A tale temperatura corrisponde una resistività $\rho_{cu} \approx 2,2 \mu\Omega \text{ cm}$.

Si supponga di predisporre, per il suddetto trasformatore, un impianto di refrigerazione funzionante fra +35 e -25 °C di temperatura del fluido refrigerante. Il rendimento teorico del ciclo di Carnot è (v. Appendice I):

$$\eta_{th} = (273 - 25) / (273 + 35) - (273 - 25) = 4,13$$

In pratica si potrà però contare su un rendimento termodinamico effettivo di circa 4, e perciò la potenza occorrente per azionare il compressore sarà circa un quarto delle perdite complessive del trasformatore. In queste condizioni esso potrà largamente erogare 130 MVA ⁽²⁾. In particolare, assumendo, per esempio, una corrente del 125 % ed una tensione del 105 % rispetto ai valori normali, si può prevedere una sopraelevazione del rame sull'olio di 35 °C, ed una sopraelevazione dell'olio sul fluido refrigerante di 45 °C. La temperatura del rame sarà di $(35 + 45 - 25) = 55$ °C. Le perdite nel rame saranno 535 kW, quelle nel ferro 165 kW, in totale, quindi, 700 kW. Per azionare il compressore in queste condizioni, col suddetto rendimento termodinamico, occorreranno perciò circa 175 kW.

Il rendimento del complesso « trasformatore + impianto di refrigerazione », sempre a $\cos \varphi = 0,8$, risulterà del 99,15 %, ossia leggermente inferiore a quello corrispondente a 100 MVA con raffreddamento ambientale. Per contro, le temperature del rame e dell'olio saranno sensibilmente più basse.

Se il trasformatore funzionasse invece alla stessa induzione e alla stessa potenza considerate per il caso del raffreddamento ambientale, la temperatura media del rame scenderebbe a 15 °C circa, e le perdite nel rame a 350 kW. Le perdite complessive sarebbero di 510 kW, e per azionare il compressore occorrerebbero circa 130 kW. Il rendimento complessivo sarebbe in questo caso il 99,19 %. Il vantaggio del raffreddamento termodinamico si limiterebbe quindi alla possibilità di ottenere basse temperature di funzionamento del trasformatore, e non sarebbe tuttavia trascurabile, in quanto consentirebbe un notevole aumento di durata della macchina.

⁽²⁾ Quanto qui sopra affermato a proposito della maggior potenza del 30 % che il trasformatore può erogare se l'olio circolante viene raffreddato, anziché con acqua a +25 °C, con un liquido a -25 °C (es. salamoia), trova, ad esempio, riscontro in questi dati, che riportiamo da una assai nota enciclopedia elettrotecnica americana (Standard Handbook for Electrical Engineers, Sec. 6-77, pag. 577 dell'ed. 1949):

« Le variazioni di carico per i trasformatori raffreddati ad acqua, per differenti temperature dell'acqua entrante, si da mantenere costanti le temperature del punto più caldo e del nucleo, danno le seguenti relazioni: Abbassando la temperatura dell'acqua entrante da 25 a 15 °C, il trasformatore può sopportare il 10 % di sovraccarico, e per temperature dell'acqua entrante al disotto dei 15 °C approssimativamente il 0,75 % per ogni °C che l'acqua entrante è al disotto dei 15 °C. Cioè per acqua entrante a 10 °C il trasformatore può sopportare approssimativamente il 13 % (ossia 0,86 % per ogni °C) di sovraccarico, e per acqua entrante a 0 °C di temperatura esso può sopportare il 19 % (ossia 0,76 % per ogni °C) di sovraccarico ... »

« In relazione al mantenere costante la temperatura del punto più caldo, il carico dovrà essere ridotto dell'1,5 % per ogni °C a disopra dei 25 °C. »

Il quoziente di sovraccarico per ogni °C, al disotto dello zero non avrebbe significato per la refrigerazione ad acqua. Impiegando però la salamoia pensiamo si possa stimare ancora uno 0,70 % di sovraccarico per ogni °C al disotto dello zero, fino a -25 °C ossia $0,7 \times 25 = 17,5$ %. Aggiungendo al 19 % di cui sopra questo 17,5 %, si arriva al 36,5 %.

L'esame comparativo tecnico economico va però fatto fra il suddetto trasformatore raffreddato termodinamicamente, che consente prestazioni di 130 MVA in servizio continuo, ed un altro trasformatore capace delle suddette prestazioni con raffreddamento ambientale. Il peso ed il costo di quest'ultimo saranno circa il 21 % maggiori; per contro, l'impianto di raffreddamento termodinamico non costerà, tutto compreso, più del 15 % del trasformatore da 100 MVA a raffreddamento ambientale. Il rapporto fra i costi d'installazione sarà dunque di 115:121 a favore del procedimento termodinamico. Resta a vedere se analogo rapporto si potrà avere anche nei costi d'esercizio e manutenzione, in quanto, se da un lato si avrà un'economia nella manutenzione del trasformatore per effetto del più favorevole regime termico di funzionamento del trasformatore stesso, dall'altro occorrerà provvedere alla manutenzione dell'impianto di refrigerazione. Quest'ultimo dovrà tuttavia lavorare a piena potenza soltanto nei periodi più caldi dell'anno e per il pieno carico del trasformatore; nei mesi invernali, o per prestazioni ridotte di potenza, l'impianto potrà lavorare a potenza ridotta, o essere addirittura arrestato.

Il circuito completo di raffreddamento termodinamico del trasformatore ora considerato, corrisponde allo schema della fig. 2, dove CE2 è la pompa di circolazione dell'acqua di raffreddamento alla temperatura ambiente, e CI è la pompa di circolazione dell'olio del trasformatore, olio che si raffredda attraversando l'evaporatore EV.

Nelle pratiche applicazioni specialmente riferentisi a centrali o sottostazioni di trasformazione, dove non è disponibile l'acqua di raffreddamento, è frequente il caso in cui i trasformatori vengono raffreddati con aerotermi. In questo caso, riferendoci sempre allo schema della figura 2, CE2 è il complesso dei ventilatori che fanno circolare l'aria di raffreddamento alla temperatura ambiente.

Volendo prevedere un impianto di raffreddamento termodinamico con raffreddamento ambientale di riserva, si arriverà all'installazione schematizzata in fig. 5, con i due aerotermi S2 ed S1 ed il compressore K. Il fluido refrigerante f_r che circola nello spazio punteggiato della fig. 5, potrebbe, nello scambiatore di calore E_1V , se le pareti non fossero a perfetta tenuta, venire a contatto con l'olio del trasformatore. Converrà perciò scegliere un fluido che non inquina l'olio stesso. Di questi fluidi ne esistono però più d'uno: basti pensare, ad esempio, all'anidride carbonica, e a tutti quei fluidi refrigeranti noti sotto il nome commerciale di « freon ».

Lo schema della fig. 5 si adatta anche a tutti i trasformatori ad aeroterma già installati, per i quali si voglia notevolmente incrementare la potenza massima erogabi-

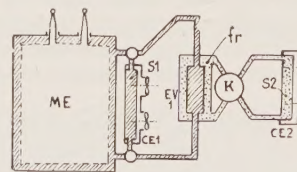


Fig. 5. — Schema di raffreddamento ambientale e termodinamico combinati per macchine con aeroterma.

le. Questo caso presenta, a nostro avviso, grande interesse pratico, in quanto il continuo e progressivo aumento di potenza richiesto dagli utenti delle zone alimentate da trasformatori, anche se essi furono inizialmente previsti con largo margine di potenza, porta prima o poi alla necessità della sostituzione dei trasformatori con altri di maggior potenza od alla loro integrazione con nuove unità. Questa sostituzione o integrazione può essere rinviata di alcuni anni, se si adotta il procedimento di raffreddamento termodinamico per le unità già in servizio. Infatti

un incremento di potenza del 30 % può sopperire per cinque anni al fabbisogno di una zona con incremento di consumo del 5 % annuo. È evidente che queste considerazioni, fatte a proposito dei trasformatori ad aerotermo, sono altrettanto valide per i trasformatori raffreddati ad acqua.

Non si può terminare l'argomento del raffreddamento termodinamico dei trasformatori, senza accennare a quelli raffreddati a gas. I gas attualmente impiegati dai costruttori di trasformatori adempiono contemporaneamente alla duplice funzione di isolamento elettrico e di raffreddamento. Già da molti anni (1906-1907) si era pensato di raffreddare i trasformatori mediante liquidi volatili quali, ad esempio il tetracloruro di carbonio e l'acetone. Solo recentemente però (1959) vennero utilizzati nuovi fluidi, quali i fluorocarburi (Westinghouse) e l'esaffluoruro di solfo (GECO), realizzando trasformatori raffreddati con tali fluidi, di potenze unitarie fino a 10 000 kVA. Il sistema GECO (v. *El. Eng.* agosto 1959, vol. 78, n. 8, pag. 828), utilizza un fluido intermedio (freon), con uno schema di raffreddamento che potrebbe apparire del tutto analogo a quello da noi illustrato nella fig. 2. La differenza è però sostanziale, in quanto nel sistema GECO la circolazione del freon avviene per gravità, senza l'azione di alcun mezzo meccanico ed il freon evapora ad una temperatura superiore a quella dell'aria ambiente. Il sistema di raffreddamento è perciò sempre ambientale, pur impiegando talune innovazioni rispetto ai sistemi di raffreddamento tradizionali, che lo avvicinano al sistema termodinamico.

Per passare al raffreddamento di tipo termodinamico nei trasformatori raffreddati a gas col sistema GECO, o Westinghouse, od altri simili, basterebbe l'impiego di un compressore per il freon o per gli altri fluidi usati.

La soluzione più interessante, a nostro avviso, sarebbe quella di impiegare un gas a più basso punto di ebollizione dell'esaffluoruro di solfo, in modo che il cassone del trasformatore possa funzionare direttamente da « evaporatore », col calore generato nel nucleo e negli avvolgimenti, mentre l'aerotermo esterno funzionerebbe da « condensatore ».

5. - ESEMPIO DI RAFFREDDAMENTO TERMODINAMICO PER TURBOGENERATORI.

L'applicazione del procedimento termodinamico al raffreddamento dei turbogeneratori si presenta, sotto certi aspetti, più vantaggiosa di quella ai trasformatori. Infatti, quasi sempre, nelle centrali termoelettriche è disponibile acqua alla temperatura ambiente, che viene impiegata per assorbire la grande quantità di calore prodotto dalla macchina termica che aziona il generatore elettrico. Inoltre, sia sullo stesso asse del turbomotore principale, sia su quello di eventuali turbomotori ausiliari può essere installato un turbocompressore per l'impianto frigorifero, e non occorre perciò installare speciali gruppi motocompressori.

In svantaggio rispetto ai trasformatori ci si trova invece per il fatto che, a parità di potenza in kVA, le perdite nei turbogeneratori sono più elevate (all'incirca doppie) di quelle nei trasformatori, e quindi l'impianto frigorifero dev'essere proporzionalmente più potente. È però notevolmente più elevato anche il costo per kVA del turbogeneratore rispetto a quello del trasformatore, e quindi l'incidenza percentuale di costo dell'impianto frigorifero per il turbogeneratore rispetto a quella per il trasformatore, potrà in ultima analisi risultare anche minore.

Riportiamo qui l'esempio di un turbogeneratore in idrogeno per centrale termoelettrica, da 100 MVA, a 50 Hz, con $\varphi = 0,8$, 3 000 giri/min.

Il circuito completo di raffreddamento termodinamico corrisponde ancora allo schema generale della fig. 2, ma è più specificatamente rappresentato nella fig. 6, dove l'impianto termodinamico è ancora indicato come in pre-

cedenti figure, e dove T è la turbina, G il generatore elettrico ed E l'eccitatrice.

Stimiamo le perdite totali interne del generatore intorno ai 1 300 kW con macchina a raffreddamento ambientale, ed intorno ai 1 000 kW con macchina della stessa potenza e tipo costruttivo (e perciò di dimensioni minori) a raffreddamento termodinamico.

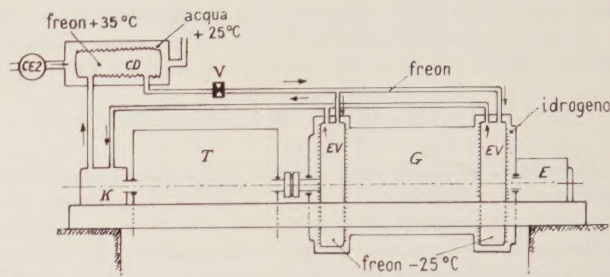


Fig. 6. — Schema di raffreddamento termodinamico per turbogeneratori.

Supponendo ancora, come per il trasformatore di cui al paragr. 4, di predisporre un impianto di refrigerazione funzionante con un salto termico di 60°C (da +35 a -25), e quindi con rendimento termodinamico effettivo di circa 4, la potenza assorbita dal turbocompressore K sarà intorno ai 250 kW. Il rendimento del complesso « turbogeneratore a raffreddamento termodinamico + impianto di refrigerazione » sarà circa uguale a quello del turbogeneratore a raffreddamento ambientale. Ciò vale però per il funzionamento a pieno carico, mentre, per carichi ridotti, risulterà sensibilmente migliore il rendimento del turbo raffreddato termodinamicamente.

Ma altri e più importanti vantaggi ci sembra possano derivare ai turbogeneratori dall'impiego del procedimento termodinamico. In una inserzione pubblicitaria sui turbogeneratori apparsa su una nota rivista di elettrotecnica americana ⁽³⁾, si legge che « il sistema di raffreddamento a liquido permette il controllo della temperatura dell'avvolgimento statorico indipendentemente dal carico », e si mette in evidenza il vantaggio di mantenere costante tale temperatura. La tecnica dei turbogeneratori non ha ancora applicato rotori raffreddati a liquido (sebbene esperimenti in tal senso siano stati fatti). Oggi s'impiega, per il rotore, l'idrogeno, con sovrappressioni rispetto all'aria esterna di 1-3 kg/cm². Con l'attuale procedimento ambientale di raffreddamento, onde « controllare », ossia « mantenere costante » la temperatura rotorica, occorre agire sulla pressione oppure sulla portata dell'idrogeno circolante nei canali rotorici e nell'intraferro: ciò sarebbe però assai complicato. Col procedimento termodinamico basta invece agire sulla temperatura dell'idrogeno circolante controllando quella degli evaporatori dai quali esso viene refrigerato. Il procedimento termodinamico consente quindi di estendere con mezzi semplici a tutta la macchina il controllo delle temperature.

Altro vantaggio del procedimento termodinamico (che si può conseguire, evidentemente per tutte le macchine elettriche alle quali esso venga applicato, ma che ha maggiore importanza pratica per i turbogeneratori) è quello dell'aumento delle potenze limiti (Appendice II).

Turbogeneratori con statore raffreddato ad olio, lamierini compresi, e rotore in idrogeno a 2 kg/cm² sono oggi costruibili per potenze limiti di 500 MVA ⁽⁴⁾. La maggiore limitazione si ha però per il rotore, poichè un aumento della pressione dell'idrogeno oltre certi limiti,

⁽³⁾ Electrical Engineering, dic. 1958, pagg. 34 A e 35 A.

⁽⁴⁾ Vedere, ad es., « Rassegna tecnica TIBB, gennaio/marzo 1960. « Si può peraltro ritenere che un aumento del rapporto di reazione rispetto a quello ivi considerato potrebbe portare, a parità di altre condizioni, a potenze limiti un po' più elevate.

se migliora il coefficiente di trasmissione del calore, fa anche aumentare le perdite per autoventilazione e la temperatura rotorica non scende più. Un aumento delle dimensioni rotoriche oltre certi limiti porta a sollecitazioni meccaniche inammissibili e ad ulteriore aumento delle perdite di autoventilazione; un aumento della temperatura dell'avvolgimento rotorico porta a sollecitazioni termiche e meccaniche nel dielettrico e nei conduttori pure inammissibili.

La circolazione di idrogeno, portato, con il procedimento termodinamico, a temperature convenientemente basse e proporzionate al carico dell'avvolgimento rotorico in modo da mantenerne la temperatura costantemente al valore più opportuno, dovrebbe consentire, a nostro avviso, se applicata ad una macchina progettata per il raffreddamento ambientale, un aumento di potenza non inferiore al 30 %. L'aumento percentuale della potenza limite per macchine espressamente progettate con raffreddamento termodinamico dovrebbe però essere notevolmente maggiore.

Volendo applicare il procedimento termodinamico a turbogeneratori già in esercizio, onde aumentarne le prestazioni massime o migliorarne le condizioni di funzionamento, si può procedere secondo quanto schematicamente indicato nella fig. 7.

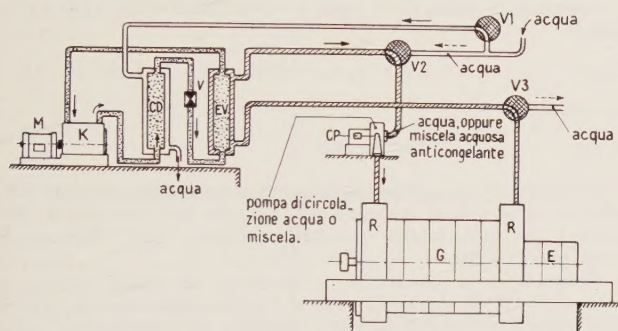


Fig. 7. — Schema di raffreddamento ambientale e termodinamico combinati per turbogeneratori

Installato cioè un impianto di refrigerazione di tipo termodinamico, costituito dal compressore *K*, dal condensatore *CD* e dall'evaporatore *EV*, si può sostituire all'acqua circolante nei refrigeranti *R, R* del turbogeneratore *G* una miscela acquosa anticongelante alla temperatura minima che si vuole ottenere. Con le valvole *V1, V2, V3*, nella posizione indicata in figura l'acqua di raffreddamento anziché nei refrigeranti *R, R*, circola nel condensatore *CD* mentre la miscela anticongelante viene raffreddata nell'evaporatore *EV*. Ruotando le valvole *V1, V2, V3*, di 90° nel senso antiorario, l'impianto di refrigerazione viene escluso dal circuito di raffreddamento del turbo, nel quale invece si può far circolare l'acqua nel modo usuale.

6. - ESEMPI DI RAFFREDDAMENTO TERMODINAMICO PER ALTRE MACCHINE ELETTRICHE.

Sempre riferendoci alle grandi e grandissime macchine elettriche, si potrebbe svolgere per i generatori accoppiati a turbina idraulica considerazioni analoghe a quelle già svolte per i turbogeneratori. Qui però le grandissime macchine sono quasi sempre lentissime (es. 180 MVA, 120 giri/min), ed il peso in kg/kVA è, evidentemente, assai più elevato che nei turbo (intorno ai 7,5 kg/kVA per il caso ora citato).

Il raffreddamento di tipo ambientale avviene generalmente in circuito chiuso con refrigeranti ad acqua. Tali grandi generatori sono perciò già predisposti per un raffreddamento di tipo termodinamico, ove, all'acqua, si sostituisca una miscela anticongelante alle temperature minime che si vogliono raggiungere, o addirittura il fluido frigorifero per il quale i refrigeranti ad acqua potrebbero servire da evaporatore.

Non riteniamo opportuno in questa sede sviluppare considerazioni specifiche o di dettaglio su vantaggi, svantaggi e bilancio finale dell'applicazione del procedimento termodinamico.

Ci sembra invece più interessante citare almeno un altro esempio di macchine elettriche soggette a particolari esigenze di servizio, per le quali il raffreddamento termodinamico potrebbe essere utile: vogliamo riferirci ai motori elettrici per la trazione ferroviaria.

Per queste macchine, come ben noto, si è sempre cercato di concentrare in un minimo volume ed in un minimo peso la massima potenza. Per contro, le condizioni elettriche e meccaniche del servizio di trazione sono fra le più gravose, e portano a costruzioni il cui peso per unità di potenza è naturalmente elevato. Speciali accorgimenti costruttivi e materiali impiegati, e Norme speciali per la trazione, che ammettono sopraelevazioni di temperatura più elevate di quelle delle altre macchine elettriche, hanno tuttavia consentito di ridurre notevolmente pesi ed ingombri dei moderni motori di trazione. Si è adottata, per esempio, la ventilazione assistita per mezzo di condotte di adduzione dell'aria nella camera del collettore. Un ulteriore passo avanti per la buona conservazione dei motori sarebbe quello di adottare la ventilazione in circuito chiuso con filtro per il polverino delle spazzole e scambiatore di calore aria-aria sistemato nella cassa del locomotore. Così facendo si aggraverebbe però il regime termico dei motori per effetto del salto di temperatura nel suddetto scambiatore di calore.

Passando invece ad un raffreddamento termodinamico, secondo quanto schematicamente indicato in fig. 8, occorrerebbe installare un gruppo motocompressore con motore elettrico, la cui potenza si aggirerebbe sul 2 % della potenza oraria complessiva dei motori di trazione, se l'aria ambiente si suppone a + 25 °C. Per contro i motori stessi, essendo raffreddati con aria alla temperatura di - 25 °C, potranno, a parità di temperature raggiunte, avere sovratemperature incrementate mediamente del 50 %, e quindi pesi unitari ridotti di circa il 25 %.

Il bilancio complessivo dei pesi va però fatto tenendo conto del peso dell'impianto di refrigerazione.

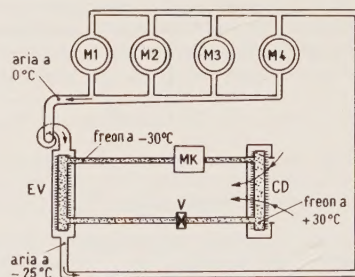


Fig. 8. — Schema di raffreddamento termodinamico per motori di trazione

Per una potenza installata di 4 000 kW, occorre un gruppo motocompressore di circa 60 kW, del peso circa di 2 t. La restante parte dell'impianto di refrigerazione, comprendente i due scambiatori di calore per 200 000 cal/h ciascuno, i ventilatori, le tubazioni ecc. porterà ad un ulteriore peso di 3 t circa. Se il peso dei motori di trazione per 4 000 kW installati orari, raffreddati nel modo usuale, viene valutato in 32 t, il bilancio complessivo dei pesi risulta di circa il 10 % a favore del procedimento termodinamico per il solo impianto motori + refrigerante. Vanno poi valutati i vantaggi ottenibili per effetto delle minori dimensioni dei carrelli, del minor peso per asse, ecc., che in alcuni casi potrebbero essere assai più importanti del risparmio di peso suddetto.

Al termine delle presenti note porgiamo un vivo ringraziamento al prof. dr. ing. Berto Cerretelli il quale non

solo ci fornì a suo tempo lo spunto per questo studio, ma ci ha poi costantemente incitati ed incoraggiati a svilupparlo ed a considerarne le applicazioni, dandoci altresì importanti consigli e suggerimenti per il suo migliore coordinamento.

APPENDICE I

È noto che la resistività di un metallo è data approssimativamente da

$$(101) \quad \varrho_t = \varrho_0 (1 + \alpha_0 t)$$

dove ϱ_t e ϱ_0 sono rispettivamente la resistività alla temperatura di t °C e alla temperatura di 0 °C, α_0 è il coefficiente di temperatura di quel metallo, relativo alla temperatura di 0 °C ⁽⁵⁾, t essendo positivo o negativo a seconda che si tratti di temperatura al disopra o al disotto di 0 °C.

Esprimendo le temperature in valore assoluto $T = t + 273$ la (101) diventa

$$\begin{aligned} \varrho_T &= \varrho_{273} [1 + \alpha_{273} (273 + t - 273)] = \varrho_{273} (1 + \alpha_{273} t) = \\ &= \varrho_0 (1 + \alpha_0 t) \end{aligned}$$

Se α_0 fosse uguale a $1/273$, sarebbe

$$\varrho_T = \varrho_0 \left(1 + \frac{t}{273} \right) = \varrho_0 \left(\frac{273 + t}{273} \right) = \varrho_0 \frac{T}{273}$$

Questa relazione ci direbbe che la resistività ϱ_T di un metallo è proporzionale alla sua temperatura assoluta T .

Ma ciò vale soltanto con una certa approssimazione, perché α_0 è diverso da $1/273$.

Tornando alla (101), si vede che la resistività ϱ_t diventa nulla quando $(1 + \alpha_0 t) = 0$, cioè quando $t = -1/\alpha_0$.

Chiamando t_{α_0} questo valore di t , possiamo dire che ϱ_t si annulla per

$$(102) \quad t = t_{\alpha_0} = -1/\alpha_0$$

Come sappiamo, t_{α_0} è prossima a -273 °C, cioè allo zero assoluto pur essendo poco diversa da metallo a metallo.

Possiamo ora, per un particolare metallo "m", porre

$$(103) \quad T_{(m)} = t - t_{\alpha_0(m)}$$

dove $t_{\alpha_0(m)}$ è la temperatura centigrada alla quale si annulla la resistività del metallo "m" avente il coefficiente di temperatura $\alpha_{0(m)}$, relativo alla temperatura di 0 °C.

La (101) diviene, in base alla (103), per il metallo "m"

$$(104) \quad \varrho_{T(m)} = \varrho_{0(m)} [1 + \alpha_{0(m)} (T_{(m)} + t_{\alpha_0(m)})]$$

ossia, per la (102), anch'essa riferita al particolare metallo "m"

$$(105) \quad \varrho_{T(m)} = \varrho_{0(m)} \alpha_{0(m)} T_{(m)}$$

La temperatura $T_{(m)}$ può denominarsi "temperatura assoluta apparente" del metallo "m". Essa non è la stessa per i vari metalli, perché, secondo la (103), dipende da $t_{\alpha_0(m)}$.

Poiché, per il rame, $\alpha_{0(m)} = 1/234,5 = 0,004264$ e quindi, per la (102), $t_{\alpha_0(m)} = -234,5$ °C, potremo assumere, come temperatura assoluta apparente di tale metallo

$$(106) \quad T_{(cu)} = t + 234,5$$

Sempre per il rame, denominando $\varrho_{0(cu)}$ la sua resistività a 0 °C, $\alpha_{0(cu)}$ il suo coefficiente di temperatura, relativo alla temperatura di 0 °C, e con $\varrho_{T(cu)}$ la sua resistività alla temperatura assoluta apparente $T_{(cu)}$, si avrà, dalla (105),

$$(107) \quad \varrho_{T(cu)} = \varrho_{0(cu)} \alpha_{0(cu)} T_{(cu)}$$

Per un metallo conduttore generico, usato in una macchina elettrica, la (107) può scriversi, con una notazione più semplice, sopprimendo l'indice (cu), relativo al rame

$$(108) \quad \varrho_T = \varrho_0 \alpha_0 T$$

⁽⁵⁾ Il coefficiente di temperatura relativo, alla temperatura di

t °C, è dato da $\alpha_t = \frac{1}{1/\alpha_0 + t}$ da cui $1/\alpha_0 = 1/\alpha_t - t$.

dove

T è la "temperatura assoluta apparente" del metallo considerato

ϱ_T è la resistività di quel metallo alla temperatura T

ϱ_0 è la sua resistività a 0 °C

α_0 è il suo coefficiente di temperatura, relativo alla temperatura di 0 °C.

Tale espressione ci dice che la resistività dei metalli è proporzionale alla loro temperatura assoluta apparente.

Veniamo ora a considerare una certa macchina elettrica "M" dove s'impieghi un materiale conduttore avente resistività ϱ_0 alla temperatura di 0 °C, nel quale si adotti una densità media di corrente σ . Le perdite, alla temperatura T , che chiameremo W_T , dovute alla corrente che percorre gli avvolgimenti (incluse anche quelle addizionali e di dispersione), si possono considerare proporzionali al peso p del conduttore, alla sua resistività alla temperatura T e al quadrato della densità di corrente σ , cioè si può scrivere

$$(109) \quad W_T = k p \varrho_T \sigma^2$$

dove k è quindi il prodotto $k p$ è costante e indipendente da ϱ_T se si accetta, come lecito, per costruzioni razionalmente eseguite, che la densità media σ e la distribuzione della corrente nel conduttore non vengano influenzate in modo apprezzabile dal valore di ϱ_T .

Sostituendo nella (109) a ϱ_T il valore dato dalla (108) e ponendo

$$(110) \quad k p \sigma^2 \varrho_0 \alpha_0 = K$$

si ottiene

$$(111) \quad W_T = K T$$

Il valore W_T rappresenta dunque le cosiddette perdite per effetto Joule che si manifestano, ad una temperatura T del conduttore, nella nostra macchina elettrica "M", sotto una data prestazione.

È ben noto ai costruttori di macchine elettriche statiche e rotanti che il dimensionamento di tali macchine atte a fornire una determinata prestazione, dipende essenzialmente dalle perdite W_T in quanto la macchina deve avere dimensioni tali da poter smaltire tali perdite senza superare una determinata temperatura.

Si può inoltre ammettere che, per un determinato tipo di macchina elettrica statica o rotante e a pari altre condizioni, le perdite nei materiali magnetici e quelle di attrito e ventilazione, in quanto connesse al peso e alle dimensioni della macchina, siano proporzionali a quelle riferibili al materiale conduttore.

In prima approssimazione, chiamando W_Q l'insieme di queste altre perdite, potremo scrivere, a regime, per una certa prestazione

$$(112) \quad W_Q = \lambda W_T$$

Indicando poi con W_Σ le perdite totali a regime, per la prestazione assunta, si avrà

$$(113) \quad W_\Sigma = W_T + W_Q = (1 + \lambda) W_T = (1 + \lambda) K T$$

Da questa ultima relazione si può dedurre, ciò che d'altronde è intuitivo, che in una macchina elettrica proporzionata per una determinata "prestazione continua" le perdite totali inerenti a tale prestazione, e quindi anche le dimensioni e il peso della macchina, sono "a parità di altre condizioni" proporzionali alla "temperatura assoluta apparente" alla quale si verrà a trovare il materiale conduttore della macchina a regime, alla determinata prestazione per la quale la macchina è prevista.

Ponendo nella (113)

$$(114) \quad K_\Sigma = (1 + \lambda) K$$

si ricava

$$(115) \quad W_\Sigma = K_\Sigma T$$

La costante K_Σ , propria della macchina elettrica "M" che interessa, esprime anche l'incremento di perdite che, per un certo regime, si deve considerare, supposto d'incrementare la temperatura di funzionamento degli avvolgimenti di 1° C.

Poniamo ora

$$T_a = t_a - t\alpha_0 = t_a + 1/\alpha_0$$

dove t_a è la temperatura in gradi centigradi dell'ambiente nel quale, a regime, funziona la nostra macchina.

La T_a , analogamente a quanto fatto per il conduttore, può essere chiamata "la temperatura assoluta apparente" dell'ambiente di funzionamento della macchina.

Chiamiamo inoltre T_{ca} la temperatura assoluta apparente che, a regime, assumerebbe il conduttore della macchina "M" raffreddata nel modo convenzionale con fluido alla temperatura T_a .

Con un determinato circuito di raffreddamento supposto tale da assicurare un coefficiente costante β di trasmissione del calore, il conduttore assumerà una sopraelevazione di temperatura ΔT_a , rispetto all'ambiente, data circa dalla

$$(116) \quad \Delta T_a \cong \frac{1}{\beta} W_{\Sigma ca}$$

ove, per effetto della (115), si indichino con $W_{\Sigma ca}$ le perdite corrispondenti alla temperatura T_{ca} .

L'uguaglianza approssimata ora scritta diverrebbe esatta se si considerasse esattamente valida la (112). Comunque, in prima approssimazione, possiamo accettare l'uguaglianza

$$(117) \quad \Delta T_a = \frac{1}{\beta} W_{\Sigma ca}$$

da cui, per la (115) si ricava

$$(118) \quad \Delta T_a = \frac{1}{\beta} K_{\Sigma} T_{ca}$$

Perciò la temperatura del conduttore sarà

$$(119) \quad T_{ca} = T_a + \Delta T_a = T_a + \frac{1}{\beta} K_{\Sigma} T_{ca}$$

Riferiamoci ora al diagramma della fig. 9 dove in ascissa sono riportate le temperature T e in ordinata le perdite W_{Σ} della macchina elettrica "M" che si considera. La retta a , uscente dall'origine o delle coordinate, rappresenta la relazione (115) essendo l'angolo θ tale che

$$(120) \quad \operatorname{tg} \theta = K_{\Sigma}$$

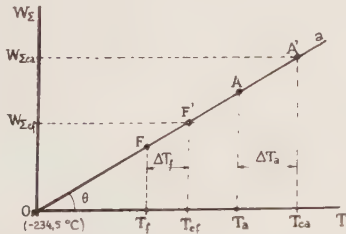


Fig. 9. — Diagramma perdite totali di una macchina elettrica in funzione delle temperature assolute apparenti.

Se, anzichè nel modo convenzionale, il calore viene asportato col procedimento termodinamico, al posto del valore T_a per la temperatura del fluido raffreddante, potremo assumere un valore T_f , minore di T_a ; ed il conduttore, nella macchina "M", dove il coefficiente di trasmissione del calore è ancora supposto uguale a β , assumerà, a regime, per la stessa prestazione, la sopraelevazione di temperatura ΔT_f , proporzionale alle perdite $W_{\Sigma cf}$.

Per la (115) si può scrivere

$$(121) \quad W_{\Sigma cf} = K_{\Sigma} T_{cf}$$

e quindi, per la sopraelevazione ΔT_f avremo, analogamente a quanto dedotto per la ΔT_a

$$(122) \quad \Delta T_f = \frac{1}{\beta} K_{\Sigma} T_{cf}$$

e la temperatura del conduttore sarà

$$(123) \quad T_{cf} = T_f + \Delta T_f = T_f + \frac{1}{\beta} K_{\Sigma} T_{cf}$$

Facendo ora il rapporto $T_a : T_f$, ossia dividendo la (118) per la (122) si ottiene la proporzione

$$(124) \quad \Delta T_a : \Delta T_f = T_{ca} : T_{cf}$$

Ed essendo, per la (115), i punti F, F' ed A, A' della fig. 9 allineati sulla retta a , sussistono anche le proporzioni

$$(125) \quad T_{ca} : T_{cf} = T_a : T_f = W_{\Sigma ca} : W_{\Sigma cf}$$

La potenza da asportare per via termodinamica dal fluido nel quale è immersa la macchina e che la raffredda, se tale fluido viene immesso e mantenuto alla temperatura T_f , è la somma di tutte le perdite che si manifestano nella macchina stessa al regime di funzionamento per il quale il conduttore assume la temperatura T_{cf} data dalla (123).

Tale somma è $W_{\Sigma cf}$.

Ora per una macchina frigorifera (v., ad esempio, Manuale Colombo al Capitolo VI della Fisica Applicata) si usa denominare "rendimento teorico" l'espressione

$$\frac{Q_2}{Q_1 - Q} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

dove

Q_2 è la potenza frigorifera (calorie trasferite all'evaporatore)
 Q_1 è la potenza totale (calorie trasferite al condensatore)
 T_2 è la temperatura assoluta del fluido frigorifero nell'evaporatore

T_1 è la temperatura assoluta del fluido frigorifero nel condensatore

Questo rendimento può essere, ed effettivamente è, per le temperature che si adottano nelle applicazioni più usuali, molto maggiore di 1, in quanto l'intervallo fra T_1 e T_2 , ossia fra la temperatura di condensazione T_1 e quella di evaporazione T_2 , risulta notevolmente più piccolo della temperatura assoluta di evaporazione T_2 . Inoltre il rendimento è tanto maggiore, quanto maggiore è T_2 e tanto minore è T_1 .

Nel nostro caso, chiamando η_{th} il rendimento teorico del ciclo termodinamico che all'uopo interessa, si ha

$$(126) \quad \eta_{th} = \frac{t_f + 273}{t_a - t_f}$$

dove t_a e t_f sono le temperature in gradi centigradi ($^{\circ}\text{C}$) corrispondenti a T_a e T_f ; cioè, supposto di riferirci al rame, si ha

$$T_a = t_a + 234,5$$

$$T_f = t_f + 234,5$$

dalle quali

$$(127) \quad t_a = T_a - 234,5 ; \quad t_f = T_f - 234,5$$

Sostituendo nella (126) si ottiene

$$(128) \quad \eta_{th} = \frac{T_f - 234,5 + 273}{(T_a - 234,5) - (T_f - 234,5)} = \frac{T_f + 38,5}{T_a - T_f}$$

La potenza meccanica occorrente teoricamente per asportare le suddette perdite $W_{\Sigma cf}$ è data perciò da

$$(129) \quad W_{mec} = \frac{W_{\Sigma cf}}{\eta_{th}} = W_{\Sigma cf} \frac{T_a - T_f}{T_f + 38,5}$$

Poniamo ora

$$(130) \quad \xi = \frac{T_f + 38,5}{T_f} = 1 + \frac{38,5}{T_f}$$

Questa espressione è sempre maggiore di 1.

La potenza meccanica teorica, data dalla (129) si può scrivere

$$(131) \quad W_{mec} = W_{\Sigma cf} \left(\frac{T_a}{T_f + 38,5} - \frac{1}{\xi} \right) = W_{\Sigma cf} \frac{1}{\xi} \left(\frac{\xi T_a}{T_f + 38,5} - 1 \right)$$

ossia

$$(131) \quad W_{mec} = W_{\Sigma cf} \frac{1}{\xi} \left(\frac{T_a}{T_f} - 1 \right)$$

E poichè dalla (125)

$$T_a : T_f = W_{\Sigma ca} : W_{\Sigma cf}$$

$$[(T_a : T_f) - 1] = [(W_{\Sigma ca} : W_{\Sigma cf}) - 1]$$

Sostituendo nella (131)

$$(132) \quad W_{mec} = \frac{1}{\xi} (W_{\Sigma ca} - W_{\Sigma cf})$$

In base a quest'ultima relazione, ricavata col procedimento ora seguito, ma che d'altra parte è anche intuitiva, si può enunciare che: "La potenza meccanica teorica che occorre spendere per azionare una macchina operatrice termica (frigorifera), la quale abbassi ad un valore inferiore a quello dell'ambiente, la temperatura in entrata di un fluido raffreddante in circuito chiuso una macchina elettrica, è più piccola della potenza che si risparmia per effetto delle minori perdite che si hanno nella macchina elettrica in conseguenza del suo funzionamento al regime termico corrispondente alla temperatura più bassa del fluido raffreddante⁽⁶⁾."

Prima di terminare la presente trattazione, giova osservare che, sebbene in essa si sia adottato un procedimento di tipo matematico, l'esattezza dell'enunciato che ne deriva è approssimata negli stessi limiti delle ipotesi fatte.

L'affermazione più discutibile è quella espressa dalla relazione (112); ma i progettisti di macchine elettriche crediamo possano ritenerla sostanzialmente accettabile, almeno in prima approssimazione, sempre che la macchina elettrica venga progettata tenendo conto che la temperatura del fluido raffreddante non è la temperatura ambiente T_a , ma è la temperatura T_f , il cui valore deve essere preso come dato di partenza per il proporzionamento della macchina.

APPENDICE II

Nella costruzione dei grandi turbogeneratori, il sistema che impiega il raffreddamento diretto dei conduttori mediante olio negli avvolgimenti statorici, e mediante idrogeno in quelli rotorici ha consentito e consentirà sostanziali aumenti nella potenza unitaria dei turbogeneratori stessi.

Gli autori S. C. Barton, J. A. Massingill, H. D. Taylor nell'AIEE «El. Eng. ott. 1959, vol. 78, pag. 1036», riportano a questo proposito un interessante grafico. Questo sistema di raffreddamento è dai suddetti autori e da numerosi altri, considerato una novità di questi ultimi anni. Gli articoli di Cain e Harrington, e di Kibourne e Holley, pubblicati dall'AIEE Power Apparatus and Systems (ago. 1956, N° 25, pag. 633 e segg.) sono interessanti a questo proposito, ma anche agli effetti dell'eventuale applicazione ai grandi turbogeneratori di un procedimento di raffreddamento termodinamico. Ne diamo qui perciò un breve riassunto.

CAIN-HARRINGTON: *Il progetto e la prestazione di moderni grandi turbogeneratori*. — Riassunto: «I progressi nell'arte della progettazione e costruzione di grandi turbogeneratori hanno portato a notevoli miglioramenti nei progetti di tipo usuale di tali macchine. Nuovi metodi di raffreddamento conducono a nuove macchine e a caratteristiche differenti. Le dimensioni fisiche dei generatori raffreddati nel modo convenzionale sono prevalentemente determinate dalla loro capacità di dissipazione del calore. I loro rendimenti non

« sono grandemente influenzati dalle loro dimensioni fisiche. « D'altra parte i generatori a conduttore raffreddato hanno « talmente accresciuto la capacità di dissipazione del calore, « che le loro dimensioni sono determinate quasi interamente da « altri fattori. Il bilancio di considerazioni economiche, come « la grandezza del generatore ed il rendimento, tendono a governare il progetto di macchine con questo tipo di raffreddamento. Le perdite sono una funzione correlativa della grandezza della macchina, della pressione dell'idrogeno, della pressione di pompatura del refrigerante, e della geometria dei passaggi refrigeranti. La scelta della pressione dell'idrogeno per la massima capacità dipende dalle caratteristiche di prestazione, come il rendimento, il rapporto di corto circuito e la capacità in aria. È mostrato come questi vari fattori sono in relazione, ed il modo in cui la loro influenza viene a manifestarsi in primo luogo sulle scelte fatte durante la progettazione del generatore, ed in secondo luogo sulle prestazioni del generatore dopo che questo è stato installato ».

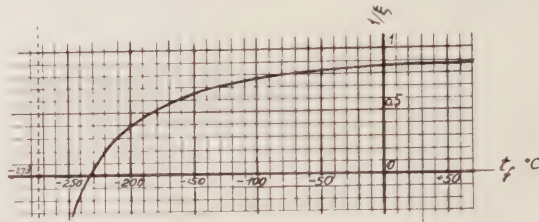


Fig. 10. — Diagramma del rapporto fra potenza meccanica spesa e potenza elettrica risparmiata nel raffreddamento termodinamico di macchine elettriche.

KIBOURNE - HOLLEY: *Raffreddamento a liquido di avvolgimenti di armatura di turbogeneratori*. — Riassunto: «Questo articolo dà un resoconto sullo sviluppo del raffreddamento a liquido di avvolgimenti di armatura di turbogeneratori. La necessità di tale sviluppo o di altri simili è messa in relazione con quella di poter disporre di unità generatrici sempre più grandi. Sarebbe desiderabile che questo sviluppo fosse suscettibile di applicazioni di circa 500 000 kVA.

« Si fa presente che molti possibili perfezionamenti nel raffreddamento furono studiati, e due di questi, uno a liquido e l'altro a gas, sono stati perfezionati e vengono ora applicati. Quello a liquido offre le maggiori possibilità di aumentare la potenza unitaria in kVA. Non è un'idea sostanzialmente nuova; ma il primo generatore (da 260 000 kVA, 3600 giri/min 18 000 V) raffreddato a liquido fu installato a East Lake dalla GECO. nel 1956. Mentre nelle macchine raffreddate in modo convenzionale il fluido lambisce esternamente i conduttori, nelle macchine coi conduttori raffreddati direttamente occorre prevedere nelle scanalature uno spazio per il passaggio del fluido. È ovvio, dal confronto fra le capacità relative di rimozione del calore dei vari fluidi (aria, elio, idrogeno, olii, acqua) che, a parità di calore asportabile, i liquidi richiedono uno spazio sostanzialmente minore ».

« Si esaminano le varie possibili soluzioni per i circuiti di circolazione del liquido in un avvolgimento di armatura, osservando che quella con conduttori cavi, usata nella predetta macchina di East Lake è la migliore. Si osserva poi che un liquido refrigerante deve avere e mantenere alte qualità dielettriche e non dar luogo a formazione di sostanze nocive o pericolose, concludendo che l'olio per trasformatori è uno dei migliori ed il più sperimentato.

« L'articolo prosegue con una descrizione del generatore di East Lake, ed illustra poi particolareggiatamente la soluzione con conduttori cavi trasposti con la disposizione Roebel e quella con condotti per la circolazione del fluido al centro delle barre conduttrici, nonché le soluzioni adottate per l'adduzione del fluido alle sbarre stesse, ossia le connessioni fra le varie sbarre e ai morsetti. La tenuta idraulica è assicurata da nastro di silicone che presenta la massima rigidità dielettrica e resistenza alle vibrazioni.

« Vengono infine descritti metodi di prova, e viene considerato il comportamento in servizio di una macchina raffreddata a liquido, concludendo che il raffreddamento a liquido è uno strumento pratico ed efficiente per accrescere la potenza ottenibile da avvolgimenti di armatura di turbogeneratori. Con questo sistema ora perfezionato non vi è più un limite termico per gli avvolgimenti d'armatura, e di conseguenza si possono progettare armature per turbogeneratori da 500 000 kVA ed oltre, a 3 600 giri/min. ».

Manoscritto pervenuto il 10 marzo 1961.

⁽⁶⁾ Essa è infatti la frazione $1/\xi$ della differenza fra le perdite $W_{\Sigma ca}$ relative alla macchina raffreddata con fluido entrante alla temperatura ambiente e le perdite $W_{\Sigma cf}$ relative alla macchina raffreddata con fluido entrante alla temperatura T_f , ossia della potenza risparmiata per effetto della più bassa temperatura di funzionamento.

I valori di $1/\xi$ in funzione di t_f , per le macchine elettriche, sono riportati nel diagramma della fig. 10.

STUDIO COMPARATIVO SUL RAFFREDDAMENTO TERMODINAMICO MEDIANTE ARIA DI GRANDI TRASFORMATORI A CIRCOLAZIONE FORZATA D'OLIO

B. CERRETELLI (*)

Considerato che le possibilità di costruzione, di trasporto e d'installazione diminuiscono gradualmente con l'aumentare della potenza unitaria del macchinario, in quanto i materiali isolanti, attualmente di largo e comune impiego, non consentono di spingere le temperature al di là di determinati limiti, per comprimere, attraverso questa via (una delle poche ancora da percorrere dopo il miglioramento delle caratteristiche magnetiche dei lamierini e di quelle dielettriche degli isolanti), le dimensioni del macchinario finito, si fa vedere, riferendosi al campo dei grandi trasformatori a circolazione forzata d'olio, raffreddato, in definitiva con aria, come invece sia possibile ridurre le dimensioni fisiche del macchinario, a pari potenza e temperatura, se si adotta il raffreddamento « termodinamico » invece di quello « ambientale ».

Si fa un confronto, tecnico ed economico, fra grandi trasformatori a circolazione forzata d'olio in raffreddamento ambientale mediante aerotermo e in raffreddamento termodinamico, impiegando sempre come mezzo raffreddante ultimo aria e supponendo di mantenere invariate potenza, reattanza e temperatura, per concludere che i vantaggi di peso (cioè d'ingombro) e di prezzo sono considerevoli per la soluzione a raffreddamento termodinamico rispetto a quella convenzionale.

Il rendimento a pieno carico risulta un po' minore, ma la circostanza è di scarso rilievo rispetto ai vantaggi che la soluzione termodinamica presenta o consente, specialmente in vista del futuro avvento delle superpotenze.

Si mostra, con un esempio, come il raffreddamento termodinamico può essere anche applicato a grandi trasformatori attualmente in servizio, conseguendosi un notevole aumento di potenza, a pari temperatura degli avvolgimenti, con una spesa relativamente modesta e, ad ogni modo, largamente inferiore a quella che comporterebbe l'aggiunta di un'altra unità di potenza adeguata.

Anche se si svilupperanno materiali isolanti atti a resistere a temperature fortemente più elevate di quelle che sono proprie agli isolanti di attuale comune impiego, il raffreddamento termodinamico non perderà probabilmente d'importanza con l'avvento di potenze sempre maggiori, perchè consentirà, ad ogni modo, l'uso di materiali isolanti meno costosi.

Ci riferiamo al caso di grandi trasformatori a circolazione forzata d'olio, raffreddato, in ultima analisi, attraverso dispositivi speciali esterni al cassone (refrigeranti o evaporatori e condensatori) mediante acqua od aria supposte rispettivamente alla temperatura di 25 °C e di 40 °C.

Escludiamo perciò di considerare l'impiego di dispositivi raffreddanti situati all'interno del trasformatore, come i cosiddetti serpentine.

Con essi si evita di dover effettuare la circolazione forzata dell'olio; tuttavia il loro uso, anche in raffreddamento termodinamico, non potrebbe non sollevare delle

obiezioni: in parte quelle che li hanno fatti abbandonare quasi totalmente nel raffreddamento ambientale operato mediante acqua circolante nel loro interno.

Come è risaputo, fra l'acqua e l'aria, il fluido più usato o preferito nella maggioranza delle moderne applicazioni, perchè sempre disponibile, è l'aria. Perciò ci riferiremo soltanto al suo impiego (diretto o indiretto) nell'istituire un confronto fra trasformatori a circolazione forzata d'olio in raffreddamento convenzionale e trasformatori a circolazione forzata d'olio in raffreddamento termodinamico, assumendo per l'aria la temperatura di 40 °C e considerando dapprima la soluzione a circolazione forzata d'olio in semplice aerotermo.

Nelle costruzioni di questo tipo, fin qui adottate, l'olio entra nel refrigerante (aerotermo) di solito alla temperatura di circa 70 °C, si raffredda di 10 °C e rientra nel trasformatore a circa 60 °C.

Ne consegue che in quanto non si vuole, nel rame, superare, a 1/1 carico, la temperatura di 100 °C, per assicurare la buona conservazione degli isolanti, la cui vita, in generale (e quindi anche quella del trasformatore), aumenta secondo una funzione inversa della temperatura massima di lavoro degli avvolgimenti, la sovratemperatura di questi ultimi, sull'olio caldo entrante nel refrigerante, risulta di circa 30 °C.

Può però questa sovratemperatura essere anche maggiore o minore di 30 °C, ma allora, generalmente, la temperatura dell'olio caldo si tiene più bassa o più alta di 70 °C in modo da avere nel rame sempre la temperatura di 100 °C. Ciò per evidenti ragioni di economia.

Adoperandosi, per il raffreddamento, aria supposta a 40 °C (massima temperatura ambiente), è chiaro che col sistema classico degli aerotermi, è la possibilità di conseguire il raffreddamento dell'olio quella che conduce a far sì che esso entri ed esca dal refrigerante ad una temperatura superiore a 40 °C. Se il salto olio aria sarà notevole, il refrigerante risulterà meno costoso, perchè di minor superficie; se tale salto sarà invece piccolo, il refrigerante diverrà più ingombrante e dispendioso. Peraltro il dimensionamento del trasformatore risulterà un po' ridotto.

Col raffreddamento termodinamico, invece, si può prescindere dal limite indicato di 70 °C per l'olio, ed il raffreddamento di esso è di massima possibile qualunque sia la sua temperatura all'entrata nel dispositivo refrigerante, supponendosi sempre d'impiegare, nell'ultimo stadio, aria a 40 °C.

Coi trasformatori a circolazione forzata d'olio in raffreddamento termodinamico può dunque all'olio essere imposta, all'entrata nel dispositivo refrigerante, una temperatura notevolmente più bassa dei comuni 70 °C. In linea generale, è sufficiente che la temperatura dell'olio sia superiore al suo punto di congelamento (circa -40 °C); praticamente molto più prossima ad esso di quanto dunque fin qui si è fatto, ma operando in modo che l'olio raffreddato si conservi tuttavia sufficientemente fluido per evitare le forti perdite di carico idrauliche a cui, alle bassissime temperature, sarebbe sottoposto il sistema di circolazione per l'aumentata viscosità del mezzo.

Pensiamo pertanto che allo scopo di non incorrere in

(*) Prof. dr. ing. BERTO CERRETELLI, Libero Docente di Costruzione di Macchine Elettriche presso il Politecnico di Torino.

incrementi apprezzabili di viscosità dell'olio, il cui dannoso effetto potrebbe, peraltro, in parte, essere compensato con l'uso di più ampie tubazioni, sia opportuno che esso circoli nel sistema di raffreddamento termodinamico a temperature, nei vari punti, non inferiori a 0 °C. Questo in linea di massima.

Se dunque, a titolo d'esempio, fissiamo in 15 °C la temperatura dell'olio all'entrata nel dispositivo refrigerante, è evidente che si può conseguire ancora la temperatura di 100 °C negli avvolgimenti, portando da 30 °C a 85 °C il salto di temperatura fra essi e gli strati superiori dell'olio caldo. Ciò consentirà un sovraccarico continuo considerevole del trasformatore con unità già costruite, oppure l'impiego, in unità di nuova progettazione, di densità di corrente nel rame notevolmente maggiori di quelle abituali, con rilevante vantaggio, in entrambi i casi, agli effetti del dimensionamento, del peso, del costo e dell'ingombro del trasformatore vero e proprio per una data potenza.

L'abbassamento della temperatura dell'olio porterà anche alla favorevole conseguenza di potere elevare alquanto i valori dell'induzione magnetica nel nucleo e di eliminare o ridurre in esso i canali di raffreddamento, con sensibile aumento della sezione attiva, perchè le temperature superficiali ed interna rimarranno facilmente dominabili nei limiti di sicurezza normali, nonostante l'aumentata sollecitazione magnetica e la riduzione della superficie totale di raffreddamento del nucleo.

Qualora non si voglia utilizzare l'aumentato salto di temperatura rame olio per ottenere, a pari peso e dimensioni del trasformatore, una potenza considerevolmente maggiore, si potrà sempre, a pari potenza, operando con gli avvolgimenti in un ambiente, per esempio, di 15 °C, anziché di 70 °C, avere il vantaggio non trascurabile, della riduzione delle perdite, nei conduttori, di circa il 25,5 %; pari alla riduzione della resistività ohmica del rame passando dalla temperatura di 100 °C a quella di 45 °C, assumendo per α_0 , coefficiente di temperatura del rame relativo alla temperatura di 0 °C, il valore $1/234,5 = 0,004264$. Con ciò aumenta considerevolmente la durata degli isolanti e quindi quella del trasformatore.

Poichè a noi interessa, più che la riduzione delle perdite nei conduttori e l'allungamento della vita del trasformatore, la possibilità di costruire, a pari peso, dimensioni e temperatura, trasformatori di potenza più elevata, rimanendo nelle limitazioni imposte dai trasporti, oppure non superandole eccessivamente; e di aderire alle esigenze dell'esercizio che si orienta sempre più, per ragioni di costo, d'ingombro e di rendimento verso l'adozione di superpotenze, utilizzeremo, con gli esempi che seguono, la diminuita temperatura dell'olio, a vantaggio del salto termico che si stabilisce fra di esso e il rame; cioè ammetteremo di operare con sovratemperatura del rame sull'olio di circa 85 °C, anziché di 30 °C, restando invariata in 100 °C la temperatura degli avvolgimenti.

Ciò porta, come abbiamo detto, ad usare densità di corrente nel rame notevolmente più elevate di quelle di comune impiego per trasformatori del genere raffreddati con aerotermino classico.

È chiaro che, se anzichè in olio, il trasformatore fosse immerso in altro fluido consenziente, oltre che condizioni di sicurezza per l'isolamento paragonabili a quelle offerte dall'olio, la possibilità di essere usato a temperature notevolmente inferiori a 0 °C, limite, questo, da noi stabilito per ragioni di viscosità dell'olio alle basse temperature, i vantaggi di un ambiente interno inferiore a 0 °C sarebbero ancora maggiori, perchè volti o verso l'ulteriore riduzione di materiali conseguente alle aumentate sollecitazioni elettriche nel rame e, in parte magnetiche dei lamierini; oppure verso l'ulteriore incremento della vita del trasformatore, quale conseguenza della diminuita temperatura di lavoro degli avvolgimenti.

Trasformatori di una certa potenza, per esempio, ad esafluoruro di solfo (SF_6), gas di apprezzabili caratteri-

stiche isolanti, sono stati costruiti negli USA, ma senza che in essi sia stato applicato il criterio del raffreddamento termodinamico.

Naturalmente questi vantaggi si ottengono a spese di una potenza meccanica che, però, anche secondo quanto vedremo in seguito, non è il caso di considerare, nel bilancio generale, come fattore negativo del sistema: quella che occorre per azionare il compressore che agisce sul fluido frigorifero del ciclo termodinamico.

Per valutare effettivamente i meriti del raffreddamento termodinamico in trasformatori a circolazione forzata d'olio, rispetto a quello classico ambientale con aerotermino e con l'uso in entrambi i casi, come ultimo fluido raffreddante, dell'aria a 40 °C, abbiamo intrapreso un particolare studio applicato ad unità di grandissima potenza (superunità) che oggi molto interessano, ma il cui eventuale impiego non può non richiamare alla considerazione delle limitazioni che segnatamente si presentano agli effetti dei trasporti e dei montaggi.

Per avere la certezza di ottenere risultati che non si limitino ad un caso singolo, ma siano validi in linea generale, si sono considerate tre grandezze di potenze, e precisamente 180, 250 e 500 MVA alla frequenza di 50 Hz, tensione primaria un valore qualsiasi compreso fra 14 e 24 kV qual'è generalmente quello per il quale vengono costruiti i grandi turbogeneratori moderni o lo saranno quelli del futuro, tensione secondaria circa 250 kV.

Il tipo di costruzione è trifase con neutro stabilmente e direttamente a terra sull'alta tensione. Altre caratteristiche sono: collegamento degli avvolgimenti triangolo stella, nucleo a cinque colonne, lamierini magnetici a cristalli orientati, isolamento principale di alta tensione solido, bobine a spire intercalate.

Per tutti i trasformatori si è assunto una reattanza di circa il 10 %, valore che riteniamo bene accetto all'esercizio e di grandezza sufficiente per assicurare, insieme all'adozione di particolari artifici costruttivi, una buona resistenza meccanica dei trasformatori al corto circuito a tensione applicata sostenuta.

Per ciascuna delle potenze indicate si sono considerate le due soluzioni di raffreddamento classico a circolazione forzata d'olio in aerotermino esterno con soffio d'aria ambiente alla temperatura di 40 °C, e di raffreddamento termodinamico facente sempre impiego, ma in stadio finale, di aria ambiente soffiata, sempre supposta alla temperatura di 40 °C.

Per rendere più omogenei i confronti, si sono disposti i calcoli in modo da considerare il sistema di circolazione dell'olio, cioè motori, pompe e tubazioni, praticamente invariato nei due casi; cioè si è supposto di lasciare circa immutata, nei due casi, come si vede dalla tabella riassuntiva, qui unita, la quantità d'olio circolante a pari potenza del trasformatore.

Inoltre, col raffreddamento termodinamico, si sono fissate al condensatore, data la maggiore efficienza della trasmissione di calore, rispetto al comune aerotermino, temperature minori di quanto usato col raffreddamento classico; cosicchè il salto medio rispetto all'aria è risultato di circa 12,5 °C.

Lo stesso salto medio di 12,5 °C si è anche adottato all'evaporatore fra temperature dell'olio e temperature del fluido intermedio in espansione.

Si è supposto, in altri termini, che col raffreddamento classico, la temperatura dell'olio uscente dal trasformatore (in alto sul cassone) cioè entrante nell'aerotermino, sia di 70 °C, mentre quella dell'olio uscente dall'aerotermino, cioè entrante nel trasformatore (in basso sul cassone) sia di 60 °C, ottenendo quindi un salto medio fra le temperature dell'olio e quella dell'aria di circa

$$\frac{70 + 60}{2} - 40 = 25 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

La fig. 1 rappresenta schematicamente questo sistema di raffreddamento.

In raffreddamento termodinamico le temperature dell'olio sono invece rispettivamente di 15 °C e di 0 °C; e poichè l'evaporatore si è immaginato operare fra le temperature di -10 °C e di 0 °C, risulta perciò un salto medio fra le temperature dell'olio all'interno del trasformatore e quelle del fluido frigorifero nell'evaporatore di circa

$$\frac{15 + 0}{2} - \frac{0 - 10}{2} = 12,5 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Dopo il compressore, rispettivamente all'entrata e all'uscita del condensatore, si sono fissate, nel fluido frigo-

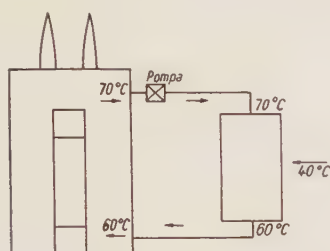


Fig. 1. — Raffreddamento convenzionale.

rifero, le temperature di 55 °C e di 50 °C, cosicchè, sempre usando aria soffiata a 40 °C, si ha un salto medio di circa

$$\frac{55 + 50}{2} - 40 = 12,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

fra la temperatura del fluido frigorifero in compressione e quella massima dell'aria ambiente.

È chiaro che in ogni punto del percorso del condensatore, come in ogni punto dell'evaporatore, il salto di temperatura deve essere sempre positivo. La fig. 2 dà, in sintesi, la rappresentazione di questo secondo sistema.

Da notare che, all'atto pratico, nei due casi, onde ottenere un uniforme raffreddamento del trasformatore, ed anche per altre ovvie ragioni, la quantità d'olio circolante

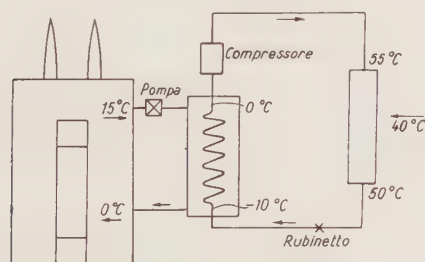


Fig. 2. — Raffreddamento termodinamico.

è stata supposta suddivisa in quattro gruppi separati uguali di equipaggiamenti refrigeranti, collocati opportunamente rispetto ai punti di accesso al trasformatore. Inoltre, per assicurare una certa riserva in caso di guasti, ciascun equipaggiamento è stato previsto per portate uguali non a 1/4, ma a 1/3 delle totali, cosicchè il raffreddamento risulta assicurato anche se 1/4 del complessivo equipaggiamento va fuori servizio.

Inoltre, con la citata suddivisione è possibile, volendo, effettuare a mano o automaticamente la parzializzazione del sistema di raffreddamento per adeguarsi alle effettive condizioni di carico, e di temperatura dell'ambiente. Va da sè che può essere opportuno di fare anche una suddivisione maggiore.

Il raffreddamento previsto nei due casi è di semplice

tipo « a efficienza costante »; e perciò non sono stati computati particolari automatismi di controllo.

La tabella riassuntiva stabilisce il diretto confronto di risultati nello studio che abbiamo intrapreso.

È esclusa in entrambi i casi, come di consuetudine, dal conto delle perdite e del rendimento, la potenza richiesta dalle pompe di circolazione dell'olio e dai ventilatori. È del pari esclusa, in raffreddamento termodinamico, la potenza assorbita dal circuito frigorifero (compressore). Su questo ultimo aspetto del bilancio energetico ritorneremo in appresso anche con qualche esempio.

Si vede, prima di tutto, con riferimento ai pesi, che incluse le motopompe di circolazione dell'olio, ma escluso il sistema vero e proprio di raffreddamento (aerotermosto convenzionale o dispositivo termodinamico), si ha, a pari potenza del trasformatore e temperatura degli avvolgimenti (100 °C), una riduzione del 28,2 %, 28,8 %, 30,1 % rispettivamente per le potenze di 180, 250, 500 MVA, passando dal raffreddamento mediante aerotermosto convenzionale al raffreddamento termodinamico.

Per quanto riguarda i prezzi, le riduzioni sono, ordinatamente, del 27,4 %, 28,6 %, 29,5 %.

Confrontando invece le due soluzioni complete ciascuna di sistema di raffreddamento, si vede che le riduzioni di peso sono rispettivamente del 12,2 %, 14,3 %, 16 % per le potenze di 180, 250, 500 MVA, mentre quelle di prezzo sono, ordinatamente, del 9 %, 11,5 %, 13,2 %.

Per quanto i pesi e più particolarmente i prezzi non abbiano, naturalmente, la pretesa di essere esatissimi, si vede tuttavia, dall'ordine di grandezza delle differenze percentuali, il vantaggio, anche economico, della soluzione termodinamica su quella convenzionale. Ma, come evidente e già detto, sono le riduzioni di peso e d'ingombro del trasformatore vero e proprio quelle che più contano specialmente in vista del futuro avvenire delle superpotenze.

Come si vede e si può dedurre dalla tabella, la soluzione mediante raffreddamento termodinamico dà luogo a rendimenti, a 1/1 carico e 75 °C e a 1/1 carico e aria a 40 °C (avvolgimenti: 100 °C) un po' minori di quelli che si ottengono in raffreddamento classico.

Ciò è comprensibile, perchè per conseguire l'aumentato salto di temperatura fra rame e olio, si è operato essenzialmente sulla densità di corrente. È tuttavia possibile, senza troppo alterare, rispetto al valore da noi stabilito, la reattanza dei trasformatori, ottenere una diversa distribuzione fra perdite nel ferro e nel rame, migliorando leggermente, rispetto a quelli da noi indicati, i rendimenti a 1/1 carico della soluzione comportante il raffreddamento termodinamico, pur rimanendo tuttavia essi, in pratica, sempre al disotto di quelli relativi alla soluzione stabilita sul raffreddamento classico.

La circostanza non ha peraltro molto rilievo, ci sembra, se, prima di tutto, specialmente in caso di superpotenze, lo scopo da raggiungere è quello di potere effettuare la costruzione con mezzi non assolutamente eccezionali d'officina, ed assicurarne il trasporto sul luogo di utilizzazione, in condizioni, praticamente, d'immediato impiego, come l'esercizio spesso desidera o gradisce.

D'altronde, se i rendimenti risultano più bassi a 1/1 carico e con aria a 40 °C, le differenze si attenuano fino ad annullarsi ed anche ad invertirsi al diminuire del carico e della temperatura ambiente. Ciò ha pure la sua importanza nel bilancio energetico esteso ad un certo periodo di tempo e in considerazione della variabilità del diagramma di carico, quando si pensi che la temperatura ambiente è quasi sempre al disotto dei 40 °C e che con unità di potenze come da noi considerato (quelle da 320 e 500 MVA non ci risultano finora realizzate), ben difficilmente si funziona continuamente a 1/1 carico.

Queste deduzioni sono valide anche se nel computo del rendimento si considera la potenza assorbita dal compres-

sore, dalle pompe e dai ventilatori (facendo ciò per giustizia di confronto anche con la soluzione convenzionale), perchè il costo della soluzione termodinamica è sensibilmente inferiore a quello della soluzione classica; e con la prima, il raffreddamento può essere effettuato secondo il procedimento «a efficienza controllata» e quindi con la eliminazione di ogni spreco di energia.

Soffermandoci sul fabbisogno di potenza meccanica necessaria per realizzare il ciclo termodinamico vero e proprio, potenza che si calcola in base a quanto indicato in Appendice I dell'articolo del dr. ing. Sogni, determiniamone il valore con riferimento, per esempio, all'unità da 500 MVA.

Con le temperature da noi stabilite del ciclo termodinamico e che ci sembrano di pratica attuazione per impiego di «freon 11» ⁽¹⁾ quale fluido frigorifero, si ha

$$\begin{aligned} T_2 &= 273 - 10 = 263 \text{ }^\circ\text{K} \\ T_1 &= 273 + 55 = 328 \text{ }^\circ\text{K} \\ \eta_{th} &= \frac{T_2}{T_1 - T_2} = \frac{263}{328 - 263} = \frac{263}{65} = 4,046 \\ W_{\Sigma cf} &= 2860 \text{ kW (v. tabella)} \\ W_{mec} &= \frac{2860}{4,046} = 707 \text{ kW.} \end{aligned}$$

Troviamo la potenza che, con la spesa di 707 kW, si risparmia.

Intanto

$$\xi = \frac{T_f + 38,5}{T_f}$$

ed essendo

$$\begin{aligned} T_f &= 234,5 + \frac{15 + 0}{2} = 242 \\ \xi &= \frac{242 + 38,5}{242} = 1,16 \end{aligned}$$

La potenza che si risparmia è

$$707 \times 1,16 = 820 \text{ kW.}$$

Quindi

$$W_{\Sigma ca} = 2860 + 820 = 3680 \text{ kW.}$$

Ma essendo

$$\begin{aligned} W_{\Sigma ca} &= W_{\Sigma cf} \frac{T_a}{T_f} \\ T_a &= \frac{W_{\Sigma ca} \times T_f}{W_{\Sigma cf}} = \frac{3680 \times 242}{2860} = 311,5. \end{aligned}$$

Ora

$$t_a = T_a - 234,5 = 311,5 - 234,5 = 77 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Questa temperatura rappresenta la media delle temperature dell'olio all'entrata e all'uscita del refrigerante in raffreddamento classico o convenzionale.

Chiamando x ed y tali temperature, e tenendo presente che in raffreddamento convenzionale abbiamo ammesso fra esse una differenza di $10 \text{ }^\circ\text{C}$, si ha

$$\begin{aligned} \frac{x + y}{2} &= 77 \\ x - y &= 10 \end{aligned}$$

⁽¹⁾ CFCl_3 .

da cui

$$\begin{aligned} x &= 82 \text{ }^\circ\text{C} \\ y &= 72 \text{ }^\circ\text{C.} \end{aligned}$$

Si conclude che col raffreddamento termodinamico si risparmiano 820 kW rispetto ad un raffreddamento convenzionale col quale le temperature massima e minima dell'olio nel cassone siano di $82 \text{ }^\circ\text{C}$ e di $72 \text{ }^\circ\text{C}$, anzichè di $15 \text{ }^\circ\text{C}$ e di $0 \text{ }^\circ\text{C}$. Tale risparmio, però, comporta una spesa di 707 kW.

In queste condizioni si ritrova che il rendimento teorico del ciclo necessario per portare l'olio dalle temperature di $82 \text{ }^\circ\text{C}$ e $72 \text{ }^\circ\text{C}$ a quelle di $15 \text{ }^\circ\text{C}$ e $0 \text{ }^\circ\text{C}$, è

$$\begin{aligned} T_a &= 234,5 + \frac{82 + 72}{2} = 311,5 \\ T_f &= 234,5 + \frac{15 + 0}{2} = 242 \\ \eta_{th} &= \frac{T_f + 38,5}{T_a - T_f} = \frac{242 + 38,5}{311,5 - 242} = \frac{280,5}{69,5} = 4,046. \end{aligned}$$

Si può anche scrivere

$$T_{cf} = 234,5 + 100 = 334,5.$$

Ed essendo

$$\begin{aligned} T_{ca} &= T_{cf} \frac{T_a}{T_f} \\ T_{ca} &= \frac{334,5 \times 311,5}{242} = 430,5. \end{aligned}$$

Supposto per omogeneità di confronti, agli effetti del peso e dell'ingombro, di mantenere «fisicamente» inalterato, per la potenza pure inalterata di 500 MVA, il trasformatore, al quale, però, si applichi il raffreddamento convenzionale, si raggiungerebbe nel rame la temperatura di $430,5 - 234,5 = 176 \text{ }^\circ\text{C}$.

Tale temperatura non è ammissibile coi materiali isolanti attualmente di comune e largo impiego.

Mentre nell'ipotesi che si potesse operare a tale temperatura, l'aerotermeo del raffreddamento convenzionale dovrebbe disperdere 3 680 kW, l'adozione, a pari potenza di 500 MVA, per lo stesso trasformatore del raffreddamento termodinamico, conduce, col rendimento indicato del ciclo di 4,046, a dover provvedere per la dispersione di 2 860 kW di perdite originantisi nel trasformatore e di 707 kW richieste teoricamente dal compressore, in totale $2 860 + 707 = 3 567 \text{ kW}$, cifra dunque leggermente inferiore a 3 680 kW; o al massimo (considerando anche le perdite proprie del compressore), dello stesso ordine di grandezza di 3 680 kW; ma con la differenza essenziale che, mentre nel primo caso la temperatura del rame sarebbe di $176 \text{ }^\circ\text{C}$, nel secondo resta entro il limite di $100 \text{ }^\circ\text{C}$.

La potenza meccanica che si deve computare nel raffreddamento termodinamico, anche se aumentata per le perdite intrinseche del compressore, è dunque bene spesa e va pertanto considerata non un fattore negativo, come potrebbe sembrare a prima vista, ma un fattore positivo del sistema.

Si vede insomma, che impostoci un determinato peso e quindi praticamente un determinato ingombro, o, come meglio si dice, una certa grandezza fisica di trasformatore per una certa potenza, quindi determinate perdite, il raffreddamento termodinamico consente di realizzare la costruzione a temperature fortemente inferiori di quelle che competerebbero al raffreddamento convenzionale, tutto restando invariato comprese le perdite.

Nel caso visto, la temperatura passa da $176 \text{ }^\circ\text{C}$ a $100 \text{ }^\circ\text{C}$.

Se si avessero isolanti, solidi e fluidi, di caratteristiche, in senso lato, tali da prestarsi alle più svariate applicazioni, e inoltre idonei a resistere alle alte temperature, nel nostro caso 176 °C, è evidente che la soluzione con raffreddamento convenzionale risulterebbe più semplice e meno costosa di quella termodinamica, purchè, però, fosse possibile ammettere che gli isolanti non aumentassero di prezzo per l'aumentata temperatura a cui potessero resistere; il che, probabilmente, anche se verranno in futuro sviluppati, non sarà. Pertanto è da attendersi che pure in tale evenienza, il raffreddamento termodinamico, che consente ad ogni modo l'impiego di materiali isolanti di più bassa temperatura e quindi meno costosi, non verrebbe a perdere d'importanza per le superpotenze.

Se poi, infine, a parità di tipo d'isolante e di temperatura, si adotta, per una determinata superpotenza, il raffreddamento termodinamico anzichè quello convenzionale, si consegue col primo una soluzione fisicamente molto ridotta che facilita fabbricazione, trasporto e montaggio, e ad un prezzo inferiore a quello che compete al raffreddamento convenzionale, come abbiamo visto. Il rendimento a 1/1 carico e con aria a 40 °C risulta un po' minore di quello della soluzione classica, ma alla circostanza non si può attribuire rilievo eccessivo davanti ai vantaggi che la soluzione termodinamica consente.

I concetti esposti sul raffreddamento termodinamico possono essere estesi a trasformatori classici a circolazione forzata d'olio in servizio allo scopo di aumentarne la potenza.

In questi casi il carico può essere incrementato fondamentalmente, fino al limite consentito dal conseguente aumento proporzionale della reattanza del trasformatore, limite che evidentemente non sussiste per unità di nuovo progetto a raffreddamento termodinamico.

Con riferimento, per esempio, ad unità trifasi, da 180 MVA, rapporto 15 000/229 000 V, 50 Hz, raffreddate a circolazione forzata d'olio mediante aerotermini convenzionali, in servizio presso un'importante centrale termoelettrica dell'Italia Settentrionale, la potenza potrebbe essere portata a circa 320 MVA, con un rendimento a 1/1 carico, $\cos \varphi = 1$ e temperatura di 75 °C del 99,36 % (99,55 % a 180 MVA), qualora fosse ammissibile per ragioni di esercizio (ed è probabile che lo sia), che la reattanza dei trasformatori salisse a circa il 22 %, essendo del 12 % quella sulla base di 180 MVA.

Come è noto, la potenza di 320 MVA per turbogeneratori è già stata realizzata negli USA e rappresenta anche quella dell'unità generatrice che verrà installata a La Spezia, la più elevata dell'Europa continentale.

Mantenendo inalterato il sistema di circolazione dell'olio, costituito da quattro motopompe separate per un quantitativo complessivo di 3 500 l/min (a rigore, ogni motopompa per costituire una riserva nel rapporto 4/3 può fornire circa 1 200 l/min), si potrebbe con una perdita totale a 1/1 carico continuativo da dissipare (aria a 40 °C) di 2 275 kW (ivi incluso un margine in più del 5 %), abbassare a 20 °C la temperatura dell'olio uscente dal trasformatore ed entrante nel dispositivo termodinamico, e a — 5 °C quella dell'olio uscente da tale dispositivo e rientrante nel trasformatore.

Lasciando invariato in 4,046, per uniformità coi calcoli da noi istituiti, il rendimento teorico del ciclo e quindi le temperature all'evaporatore e al condensatore già da noi fissate, risulta che la potenza meccanica teorica richiesta dal compressore è di 562 kW, quella risparmiata di 562 kW e quella teorica da dissipare nel condensatore di $2\,275 + 562 = 2\,837$ kW, potenza che in raffreddamento convenzionale ammonterebbe teoricamente a $2\,275 + 652 = 2\,927$ kW.

Ma il vantaggio appunto è che praticamente a pari potenza da disperdere nell'ambiente aria a 40 °C, la tempe-

		Potenza MVA	Peso incluso olio t	Prezzo × 10 ⁶ Lire (1)	Perdite in % a 1/1 carico 75 °C		Rendi- mento in % a 1/1 carico, 75 °C cos φ = 1	Tempera- tura olio uscente dal trasf. °C	Tempera- tura olio entrante nel trasf. °C	Perdite da dissipare a regime di 1/1 ca- rico con aria a 40°C, kW (2)	Olio di circolazio- ne, litri al minuto primo (3)
					Fe	Cu					
Trasformatore raffreddato mediante circolazione forzata d'olio e aerotermini classici. Temperatura aria: 40 °C.	Incluso moto- pompe di circo- lazione olio, ma escl. aerotermini	180	181	190	0,11	0,34	99,55	70	60	885	3500
		250	229	241	0,1	0,28	99,62	70	60	1055	4150
		500	346	359	0,085	0,245	99,67	70	60	1820	7100
	Incluso moto- pompe di circola- zione olio e aro- termi; cioè tra- sformatore com- pleto	180	189	200	0,11	0,34	99,55	70	60	885	3500
		250	238	252	0,1	0,28	99,62	70	60	1055	4150
		500	362	376	0,085	0,245	99,67	70	60	1820	7100
Trasformatore raffreddato mediante circolazione forzata d'olio e dispositivo termodi- namico. Temperatura aria: 40 °C.	Incluso moto- pompe di circola- zione olio, ma escluso dispositi- vo termodina- mico	180	130	138	0,095	0,605	99,30	15	0	1410	3650
		250	163	172	0,085	0,515	99,4	15	0	1665	4300
		500	242	253	0,075	0,435	99,49	15	0	2860	7400
	Incluso moto- pompe di circola- zione olio e di- spositivo termo- dinamico; cioè trasformatore completo	180	166	182	0,095	0,605	99,3	15	0	1410	3650
		250	204	223	0,085	0,515	99,4	15	0	1655	4300
		500	304	330	0,075	0,435	99,49	15	0	2860	7400

(1) In base alle correnti quotazioni. — (2), (3) Incluso un margine in più del 5%.

ratura degli avvolgimenti resta nel limite normale di 100°C , e quindi il trasformatore sia pure a carico fortemente incrementato (da 180 a 320 MVA), rimane negli abituali confini di sicurezza.

In fondo, tutto il gioco, nel raffreddamento termodinamico, si identifica essenzialmente nella riduzione della temperatura di funzionamento e quindi della resistività del conduttore nell'ambiente (quello di macchina) in cui il conduttore stesso viene ad operare.

Interpolando i dati di tabella, si deduce che la spesa per introdurre il raffreddamento termodinamico nei citati trasformatori in servizio, ammonterebbe, comprese le riserve di equipaggiamento sempre nel rapporto 4/3, a circa 59 milioni di lire per unità. Con tale spesa, si incrementerebbe, dunque, la potenza di ogni trasformatore di ben $320 - 180 = 140$ MVA.

È un incremento, che ottenuto con un secondo trasformatore a circolazione forzata d'olio in raffreddamento classico, mediante comuni aerotermini, comporterebbe l'aggiunta di un'unità il cui peso e costo sarebbero rispettivamente, sempre interpolando gli elementi da noi indicati in tabella, di circa 158 t e 171 milioni di lire.

A parte altri vantaggi, come minor ingombro ecc., e pur valutando a zero il ricupero degli aerotermini classici, quello economico è d'importanza evidente.

In tutta la nostra trattazione abbiamo considerato come mezzo di raffreddamento l'aria a 40°C .

È evidente che a risultati analoghi saremmo pervenuti qualora, anziché l'aria a 40°C , avessimo considerato, come talvolta si fa, ma più raramente, l'acqua a 25°C , cioè avessimo preso in esame trasformatori a circolazione forzata d'olio raffreddato mediante refrigeranti ad acqua

a 25°C ; oppure raffreddato mediante dispositivo termodinamico facente impiego, in ultimo stadio, di acqua ancora a 25°C .

Quando comunque come mezzo di raffreddamento s'impiega acqua anziché aria, si usa diminuire di 15°C la temperatura totale degli avvolgimenti, in modo da avere in essi 85°C anziché 100°C ; e ciò per tener conto di un margine di sicurezza che consenta di continuare il servizio, per un certo periodo di tempo, anche in mancanza temporanea di acqua.

Col raffreddamento classico, l'olio entra nel refrigerante normalmente a 55°C ($70 - 15$) ed esce a 45°C ($60 - 15$). Col raffreddamento termodinamico si supporrebbero invariate le temperature dell'olio pur senza che esse scendessero, in linea di massima, al disotto di 0°C , come già detto. Dovendo perciò il salto di temperatura fra rame e olio diminuire di 15°C , ciò porterebbe ad usare negli avvolgimenti densità di corrente alquanto minori di quelle impiegabili con aria. Essendo peraltro il raffreddamento ad acqua, per il condensatore, assai più efficiente di quello ad aria, i vantaggi economico, di peso e d'ingombro della soluzione termodinamica rispetto a quella convenzionale, sarebbero maggiori.

Chiudendo, desideriamo ringraziare particolarmente la Spett. Società Termomeccanica di La Spezia per gli elementi da essa fornitici riguardanti impianti di refrigerazione. Questi elementi ci hanno permesso di considerare pienamente attuabile il procedimento termodinamico e di valutare inoltre la sua incidenza tecnico economica per i casi da noi considerati.

Manoscritto pervenuto il 10 marzo 1961.

PROPRIETÀ ELETTRICHE DEI MATERIALI BIOLOGICI

ANTONIO ZANINI (*)

Al fine di documentare l'impiego della tecnica elettronica nelle ricerche elettrofisiologiche, si riassumono le proprietà elettriche attive e passive dei più importanti materiali biologici e si descrivono le tecniche più diffuse per la misura di queste caratteristiche.

PREMESSA.

In questi ultimi anni si è sviluppato, in una forma sempre più vasta ed importante, l'impiego della tecnica elettronica nel campo biologico e medicale, allo scopo di costruire apparecchiature destinate alla ricerca pura, alla diagnosi ed alla terapia.

L'elettronica ha infatti permesso a queste discipline uno sviluppo decisivo, non solo rendendo le misure più accurate e sensibili, ma aprendo essa stessa nuovi campi di indagine. Si deve peraltro riconoscere che essa si è giovata a sua volta dell'esperienza fatta in queste particolari applicazioni, essendo frequente il caso di apparecchiature che, progettate inizialmente per questi scopi, hanno successivamente trovato un impiego del tutto generale.

Tuttavia, molte difficoltà di varia natura concorrono tuttora ad ostacolare la diffusione della tecnica elettronica nelle attività biologiche e mediche. Una delle più importanti consiste nelle origini profondamente diverse che distinguono queste due branche della scienza, nonché nelle diverse forme mentali ormai da tempo consuete agli studiosi delle rispettive parti. La vastità delle cognizioni attualmente raggiunta rende praticamente impossibile l'identificazione delle due funzioni, ingegneristica e biomedica, in una stessa persona, ma si può tuttavia affermare che il successo di una ricerca di tal genere risiede in gran parte in una collaborazione fondata sulla comprensione reciproca dei linguaggi: essa, da una parte, deve permettere all'elettronico di acquistare una precisa nozione dei dati biologici del problema a lui sottoposto e, dall'altra, deve fornire al biologo la conoscenza delle possibilità e delle limitazioni offerte dalla tecnica elettronica.

La necessità di una siffatta collaborazione si mette in evidenza soprattutto nelle ricerche elettrofisiologiche, dove la natura delle manifestazioni elettriche è tale da richiedere l'impiego di strumenti elettronici, sia di osservazione che di registrazione, per i quali deve verificarsi un adattamento elettrico ai materiali biologici, sede dei fenomeni, tale da attribuire a queste misure una sensibilità e una fedeltà di riproduzione che garantiscano la sicura interpretazione dei dati osservati. La conoscenza delle proprietà elettriche di questi materiali è pertanto opportuna sia per il progetto degli apparecchi ad essi destinati, sia per correggere eventuali imprecisioni insite nel metodo stesso di misura.

Con questo intendimento, si riassumono qui brevemente le proprietà elettriche passive ed attive dei materiali biologici più importanti e che maggiormente necessitano, per il loro studio, dell'impiego di apparecchiature elettroniche e si forniscono alcuni cenni sulle tecniche più diffuse per la misura di queste caratteristiche.

CENNI SULLA COMPOSIZIONE DEI MATERIALI BIOLOGICI.

L'esame istologico degli organi viventi individua nella cellula il componente fondamentale. Essa può assumere forme tra loro molto diverse ma, in genere, è costituita da una membrana relativamente rigida e con bassa conduttività elettrica, contenente una soluzione salina in cui si muovono liberamente alcuni elementi subcellulari (nuclei, mitocondrie, ecc.) i quali possiedono a loro volta strutture simili a quella della cellula. La soluzione circostante ed interna a questi elementi contiene molte macromolecole (principalmente proteine ed acidi nucleici) di dimensioni molto grandi rispetto a quelle delle molecole che compongono il liquido avente una elevata concentrazione salina.

La membrana, oltre a dare rigidità alle cellule, svolge l'importante funzione di regolare, attraverso dei pori, lo scambio di materia tra l'interno e l'esterno della cella. Essa è costituita da uno strato lipidico, probabilmente bimolecolare, ricoperto sulle due facce da strati proteici. Lo spessore totale della membrana è di $100 \div 150 \text{ \AA}$.

Una classe ben distinta di cellule è quella che costituisce il sistema nervoso. La sua complessità aumenta con il grado di evoluzione della specie, ma le cellule costitutive, così come i fenomeni elettrici ad esse connessi, rivelano caratteristiche qualitativamente confrontabili. Data l'importanza delle funzioni svolte da queste cellule, individuate con il nome di «neuroni», esse polarizzano l'attenzione di un grande numero di ricercatori.

La configurazione geometrica del neurone presenta un numero non molto grande di varietà, riconducibili nell'uomo ad una dozzina di tipi fondamentali, di cui alcuni sono rappresentati in fig. 1. Nelle forme più complete si possono convenzionalmente individuare le tre seguenti parti (le ultime due non sempre sono presenti):

a) il corpo, costituito dalla parte centrale del neurone e che può assumere forma compatta oppure allungata in due o più protuberanze (neuroni bipolari e multipolari);

b) il dendrite, formato da ramificazioni finemente suddivise che si sviluppano sulla superficie del corpo e che alle loro estremità raggiungono dimensioni submicroscopiche;

c) il cilindrasse, costituito da una lunga appendice sottile che si diparte dal corpo fino a raggiungere altri neuroni o elementi muscolari e ghiandolari, ai quali si collega con speciali organi (giunzioni interneuroniche e citoneuroniche); esso può essere rivestito da una guaina di mielina che svolge la funzione di isolante elettrico e che si interrompe ad intervalli regolari (nodi).

Il dendrite ed il cilindrasse, pur avendo una analoga costituzione, si differenziano per il fatto che nel primo gli impulsi elettrici si propagano dalla periferia al corpo mentre nel secondo la propagazione avviene dal corpo verso le giunzioni. Il cilindrasse può suddividersi in più rami ad una certa distanza dal corpo.

Nel cervello umano esistono circa 10^{10} neuroni. Il corpo ha un diametro generalmente inferiore a $0,1 \text{ mm}$, mentre il cilindrasse può raggiungere la lunghezza di alcune decine di centimetri. Una caratteristica peculiare dei neuroni è quella di risultare privi della sostanza chimica addetta alla scissione delle cellule: essi pertanto apparentemente non si riproducono.

(*) Dr. ing. ANTONIO ZANINI, Istituto Superiore Poste e Telecomunicazioni, Fondazione «U. Bordini», Roma.

Un'altra classe di cellule è quella delle fibre muscolari, il cui comportamento è direttamente controllato dalle celle nervose attraverso le innervazioni sopra citate. Queste fibre hanno una forma molto allungata, con un rap-



Fig. 1 — Tipi di cellule nervose.

(I) cellula a T dei gangli spinali; (II) cellula di Purkinje del cervelletto; (III) cellula bipolare della retina. (c = corpo; a = cili-drasse; d = dendriti, s = sinapsi).

porto lunghezza-diametro che può variare da circa 100 nelle fibre di alcune grosse anellidi fino addirittura ad alcune decine di migliaia in certi muscoli umani. In alcuni esseri inferiori possono assumere forme diverse da quella fusiforme.

Negli esseri superiori, ogni muscolo è costituito da molte fibre; i muscoli che devono svolgere azioni molto grossolane sono controllati da poche celle nervose (una ogni 20÷100 fibre muscolari); quelli che devono effettuare movimenti molto precisi, come i muscoli oculari, sono controllati da molte celle nervose (circa una ogni 10 fibre). Il complesso costituito dal neurone e dalle fibre muscolari ad esso collegate viene denominato « unità neuromotoria ».

PROPRIETÀ ELETTRICHE PASSIVE.

Per i materiali biologici sopra descritti, la permeabilità magnetica si identifica con quella del vuoto; la conduttività k e la costante dielettrica ϵ variano invece notevolmente a seconda del materiale. Queste due grandezze elettriche possono essere sintetizzate nella costante dielettrica complessa $\epsilon' = \epsilon - j/k\omega$, alla quale risulta proporzionale, secondo il fattore $j\omega$, l'ammittenza dell'unità di volume della materia. Attualmente si ritiene che queste caratteristiche siano indipendenti, entro certi limiti, dal potenziale applicato; la loro dipendenza dalla frequenza è invece molto forte e assai diversa secondo il materiale esaminato.

La molecola dell'acqua è polare e la sua costante dielettrica relativa varia da $\epsilon_0 = 78$ in regime stazionario a $\epsilon_\infty = 6\div 8$ in regime sinusoidale ad altissima frequenza. L'aggiunta di sali non altera sensibilmente la costante di tempo dell'acqua, se si eccettua una piccola diminuzione di ϵ_0 all'aumentare della concentrazione ionica.

Le proteine e le altre macromolecole sopportano una distribuzione di carica per cui possono essere assimilate ad un dipolo elettrico. Pertanto anch'esse presentano un comportamento polare e mettono in evidenza una forte dipendenza della loro costante dielettrica dalla frequenza. Tuttavia, per effetto delle loro dimensioni, queste molecole non possono seguire campi variabili ad altissime frequenze ed in tal caso la loro ϵ scende a valori molto minori di quello dell'acqua, per cui nelle soluzioni elettrolitiche esse si comportano come « buchi dielettrici » (fig. 2). Infine, la loro conduttività mostra sempre valori estremamente bassi.

Grande importanza assumono le caratteristiche elettriche delle membrane, la cui determinazione raggiunge approssimazioni soddisfacenti nelle celle più grosse, dove

è possibile effettuare misure dirette penetrando nell'interno della cella con un microelettrodo. Sia con questo metodo che con misure effettuate dall'esterno, è stato osservato che la costante dielettrica della membrana è in genere variabile con la frequenza, mentre la sua conduttività dipende dalla frequenza in maniera tale che l'angolo di fase rimane praticamente costante. La presenza di pori, attraverso i quali si svolge la funzione biologica delle membrane, sembra non alterare sensibilmente la capacità totale di esse, ma soltanto introdurre una conduttanza addizionale in parallelo al circuito RC

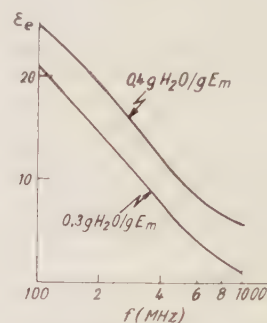


Fig. 2. — Costante dielettrica dell'emoglobina in funzione della frequenza, per due diversi valori di idratazione.

che rappresenta il corpo della membrana: il circuito equivalente complessivo è quindi del tipo indicato in fig. 3. Per molti scopi, è sufficiente considerare gli effetti globali dell'ammittenza della membrana, che può quindi essere semplicemente rappresentata da una resistenza e da una capacità in parallelo, per le quali i valori più comuni sono rispettivamente 0,5÷5 $k\Omega \cdot \text{cm}^2$ e circa 1 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$. Questi valori devono essere ritenuti attendibili solo per frequenze superiori alla gamma audio, dove si verificano generalmente variazioni molto sensibili. Anche le membrane degli elementi subcellulari presentano caratteristiche simili a quelle delle membrane cellulari.

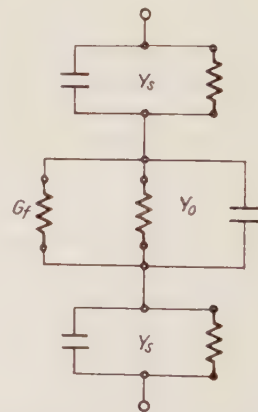


Fig. 3. — Circuito equivalente della membrana. (Y_s , ammettenza superficiale; Y_0 , ammettenza dello strato lipo-proteico; G_f , conduttanza del foro).

La costante dielettrica dei tessuti biologici, considerata come sospensioni molto dense di cellule, presenta sensibili decrementi in corrispondenza di tre gamme di frequenza, generalmente ben definite, così come è indicato nella fig. 4, riferendosi a tessuti muscolari. Queste tre zone sono note con il nome di dispersioni α , β e γ . La prima si verifica intorno a 100 Hz e sembra dovuta ad un meccanismo di controllo degli scambi metabolici

attraverso la membrana cellulare, implicante un tempo di ritardo tra lo stimolo e la risposta. La dispersione β , osservabile tra 100 kHz e 10 MHz, è da imputare proprio alla struttura cellulare dei tessuti e l'elevato valore di ε da essi posseduto nel campo delle frequenze più basse è prodotto dalla natura delle membrane cellulari. Infine, le proprietà elettriche dei tessuti alle altissime frequenze (al di sopra di 100 MHz) sono determinate principalmente dal loro contenuto in acqua, sali e proteine, e sono simili per tutti quei tessuti per i quali questo contenuto è elevato. La conduttanza e la costante dielettrica variano lentamente per frequenze comprese tra 100 e 1000 MHz: la prima presenta un rapido incremento oltre i 1000 MHz e la seconda una forte diminuzione al di sopra di 3000 MHz. Entrambi gli effetti concordano con il comportamento dell'acqua in questa gamma di frequenze.

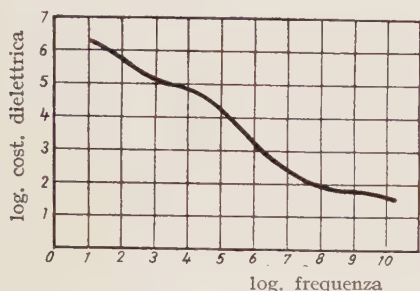


Fig. 4 — Costante dielettrica del tessuto muscolare in funzione della frequenza.

Nella seguente tabella sono riassunti i valori di k e di ε misurati da diversi sperimentatori per alcuni più importanti tessuti biologici e per alcune frequenze comprese tra le V.H.F. e le microonde. La fig. 5 indica le stesse grandezze osservate per la pelle in un'analoga gamma di frequenze.

La conoscenza delle caratteristiche elettriche passive dei materiali biologici risulta necessaria per la comprensione di molti fenomeni bioelettrici, tra i quali, in primo luogo, la propagazione degli impulsi nervosi, la determinazione dell'idratazione delle macromolecole, lo studio degli scambi ionici attraverso le membrane, ecc. In elettrocardiografia essa permette di interpretare correttamente i potenziali prelevati sulla superficie del corpo che dipendono, oltre che dall'attività cardiaca, anche dall'impedenza dei tessuti interposti. Nello studio degli ef-

fetti delle onde elettromagnetiche sul corpo umano, essa consente di determinare la profondità di penetrazione alle varie frequenze.

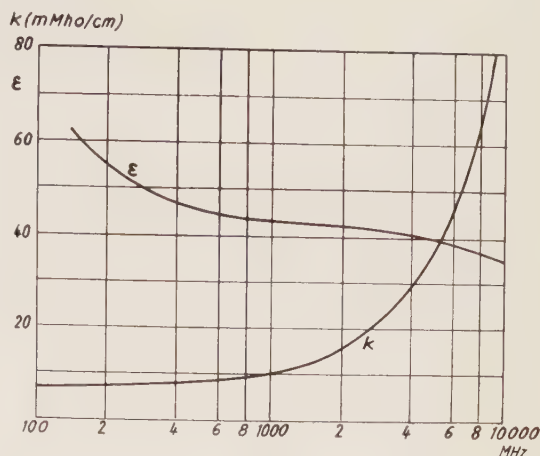


Fig. 5. — Costante dielettrica e conduttività della pelle in funzione della frequenza.

PROPRIETÀ ELETTRICHE ATTIVE.

Le celle del sistema nervoso e le fibre muscolari esplicano una attività elettrica straordinariamente intensa che sta alla base di tutte le manifestazioni vitali, sia coscienti che vegetative, degli esseri umani. Essa consiste in una successione, più o meno ordinata e di diversa frequenza, di impulsi di breve durata ai quali è devoluto il compito di trasmettere tutte le informazioni tra le diverse parti del corpo (conduzione di una sensazione dai recettori esterni ai neuroni centrali, invio di un comando di azione o di inibizione da un neurone ad un muscolo, ecc.). La caratteristica peculiare di questi impulsi è quella di assumere una velocità di propagazione variabile con l'elemento biologico esaminato ma indipendente dallo stimolo che li ha prodotti, la cui intensità determina soltanto la loro frequenza di ripetizione.

Come si vedrà meglio in seguito, il meccanismo tipico della propagazione degli impulsi nervosi è quello della loro continua rigenerazione concentrata in particolari punti dei neuroni. Pertanto, agli elementi che ne rappresentano le caratteristiche elettriche passive, si devono associare dei generatori di impulsi distribuiti lungo di essi, i quali, in condizioni di riposo, risultano fornire

COSTANTE DIELETTRICA ε E CONDUTTIVITÀ K (mMho/cm) PER VARI TESSUTI DEL CORPO A 37 °C.

f (MHz)	25	50	100	200	400	700	1000	3000	8500
Muscolo . . . ε	103 ÷ 115	85 ÷ 97	71 ÷ 76	56	52 ÷ 54	52 ÷ 53	49 ÷ 52	45 ÷ 48	40 ÷ 42
k		6,8 ÷ 8,85		9,52 ÷ 10,5	11,1 ÷ 11,8	12,7 ÷ 13,7	12,7 ÷ 13,3	21,7 ÷ 23,3	83,3
Musc. cardiaco. ε				59 ÷ 63	52 ÷ 56	50 ÷ 55			
k				8,7 ÷ 10,5	10 ÷ 11,8	10,5 ÷ 12,8			
Fegato ε	136 ÷ 138	88 ÷ 93	76 ÷ 79	50 ÷ 56	44 ÷ 51	42 ÷ 51	46 ÷ 47	42 ÷ 43	34 ÷ 38
k	4,76 ÷ 5,41	5,13 ÷ 5,78	5,59 ÷ 6,49	6,67 ÷ 9,09	7,69 ÷ 9,52	8,7 ÷ 11,8	9,43 ÷ 10,2	20 ÷ 20,4	58,8 ÷ 66,7
Cervello. . . . ε	> 160	110 ÷ 114	81 ÷ 83						
k	4,55	4,76 ÷ 5,26	5,13 ÷ 5,56						
Grasso ε		11 ÷ 13		4,5 ÷ 7,5	4 ÷ 7		5,3 ÷ 7,5	3,9 ÷ 7,2	3,5 ÷ 4,5
k		0,4 ÷ 0,59		0,29 ÷ 0,95	0,36 ÷ 1,11		0,83 ÷ 1,49	1,11 ÷ 2,27	2,7 ÷ 4,17
Rene ε	> 200	119 ÷ 132	87 ÷ 92	62	53 ÷ 55	50 ÷ 53			
k		6,9 ÷ 11,1		11,1	11,8	1,3 ÷ 1,32			

un potenziale costante diverso da zero. Sotto un punto di vista circuitale, questi generatori di impulsi possono essere suddivisi in due categorie: quelli che risiedono nei corpi delle cellule neuroniche e delle giunzioni, e quelli che risiedono nei cilindri e nelle fibre muscolari. Queste due categorie si differenziano altresì per la diversa ampiezza dell'impulso prodotto.

Si consideri ad esempio, una tipica unità motoria costituita da un neurone, dal suo cilindro, dalla giunzione citoneurale (placca motrice) ed infine dalla fibra muscolare. Il neurone può a sua volta essere comandato da un altro neurone attraverso una giunzione interneurale (sinapsi). Il circuito elettrico equivalente (fig. 6) di questa unità motoria è costituito da una serie di celle in cascata rappresentanti in successione il corpo del neurone, i nodi e gli internodi, la placca motrice e la fibra muscolare.

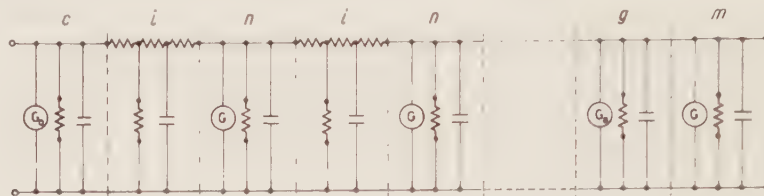


Fig. 6. — Circuito equivalente di una unità motoria.

(*c*, corpo del neurone; *i*, internodo; *n*, nodo; *g*, giunzione citoneurale; *m*, fibra muscolare).

I generatori di impulsi situati in corrispondenza dei nodi traggono origine, secondo le teorie attualmente più accreditate, da una diversa concentrazione ionica esistente all'interno e all'esterno degli assi nervosi e delle fibre muscolari. Importante è soprattutto la diversità concernente gli ioni di potassio e di sodio: la concentrazione interna del potassio è alcune decine di volte superiore a quella esterna, mentre per il sodio la concentrazione interna è circa un decimo di quella esterna. A queste diverse concentrazioni corrispondono due potenziali di equilibrio, rispettivamente per il potassio ed il sodio, calcolabili con la formula di Nernst, ed aventi segni opposti. La permeabilità della membrana di queste celle è diversa per i due ioni ed in condizioni di riposo quella offerta agli ioni di potassio, pur essendo bassa, è molto maggiore di quella offerta agli ioni di sodio. Pertanto questa situazione può essere rappresentata da un circuito elettrico (fig. 7 *a*) in cui compaiono in parallelo i due potenziali di equilibrio ciascuno avente in serie una re-

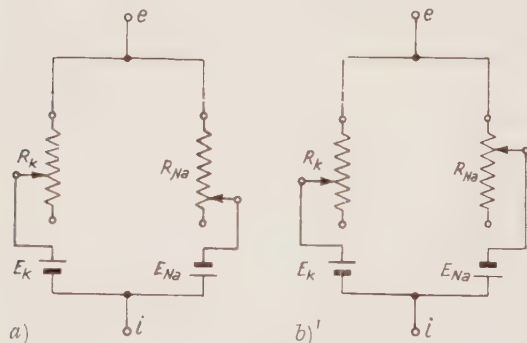


Fig. 7. — Circuito equivalente del generatore di un nodo.

sistenza eguale al reciproco della corrispondente permeabilità ionica. Di conseguenza, in tali condizioni, può essere osservata attraverso la membrana una d.d.p. costante prossima ad E_K , essendo il potenziale interno inferiore a quello esterno, e di valore aggirantesi normalmente intorno a 70÷100 mV. Questa d.d.p. è comunemente denominata « potenziale di riposo » o « di membrana ».

La permeabilità della membrana ai due ioni è funzione, tra l'altro, della d.d.p. esistente tra le due facce. Infatti se a questa viene applicata una tensione di ampiezza opportuna ma comunque inferiore alla f.e.m. E_{Na} e di segno concordante con essa, la resistenza R_{Na} subisce una rapida diminuzione per effetto della quale essa diviene molto minore di R_K . Per questo motivo, la d.d.p. attraverso la membrana passa, in un tempo brevissimo, da un valore prossimo ad E_K ad uno prossimo ad E_{Na} (fig. 7 *b*) ed il potenziale assunto in queste condizioni dall'interno della cella è indicato col termine di « potenziale di azione ». Questa situazione si mantiene per un periodo generalmente dell'ordine di un millisecondo, dopo di che R_{Na} torna al valore primitivo. Nel frattempo però, anche R_K ha subito una diminuzione che agisce con un ritardo maggiore e che perciò assume importanza quando già R_{Na}

si è ristabilita al valore iniziale. Questa diminuzione di R_K determina il passaggio di una corrente di segno opposto alla precedente e consente quindi alla capacità della membrana di ricaricarsi rapidamente al valore iniziale. Il potenziale di azione presenta dunque la forma tipica dell'impulso che riveste una validità del tutto generale, pur con le varietà contingenti alle diverse specie naturali (fig. 8).

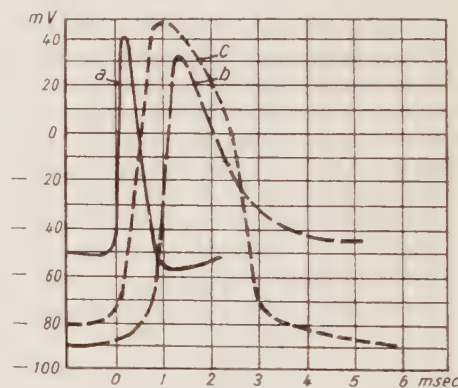


Fig. 8. — Forme d'onda tipiche di alcuni potenziali di azione registrate con elettrodi intracellulari.

a, fibra nervosa della seppia; *b*, fibra del muscolo sartorio della rana (lontano dal punto di innervazione); *c*, fibra nervosa dell'anguilla.

Pertanto i generatori del tipo ora descritto possono assumere due sole determinate condizioni: quella di riposo e quella di azione (legge del tutto o niente); questo secondo stato può verificarsi solo se il generatore viene eccitato da un potenziale superiore al livello di soglia, che generalmente si aggira intorno a 10 mV.

Per effetto della permeabilità agli ioni di potassio e di sodio offerta dalla membrana cellulare nei diversi stati da essa assunti, si verifica la tendenza ad una continua migrazione di questi ioni nel senso del rispettivo gradiente di potenziale. Nello stato di quiete, si osserva soprattutto un flusso di ioni K^+ verso l'esterno della cella, mentre durante lo stato attivo la cella subisce la perdita di

una piccola quantità di ioni K^+ ed acquista un'analoga quantità di ioni Na^+ .

Questi scambi, che tenderebbero a modificare il grado di concentrazione ionica all'interno ed all'esterno della cella, sono compensati da un processo metabolico di cui è già stata accertata l'esistenza, anche se non ne sono noti tutti gli effetti da esso prodotti. Esso consiste in un vero e proprio pompaggio degli ioni K^+ e Na^+ in direzione opposta al rispettivo gradiente di potenziale, talchè questo flusso possa equilibrare quello dovuto alla diffusione. Ovviamente un tale meccanismo richiede la somministrazione di una certa quantità di energia che viene fornita dai processi metabolici.

Il potenziale di azione prodotto da un nodo percorre l'internodo subendo sia attenuazione che distorsione ma, in condizioni normali, giunge al nodo seguente con una ampiezza superiore al livello di soglia e pertanto anche questo viene posto nello stato attivo. L'impulso nervoso si propaga così lungo il cilindrase con una velocità che nell'uomo varia da circa 1 m/s fino a diverse decine di m/s.

I generatori delle giunzioni hanno invece un'origine che, sebbene tuttora discussa, risulta connessa con più evidenza a fenomeni chimici di maggiore complessità. Si ritiene attualmente che le fibre nervose emettano, in corrispondenza delle giunzioni (sia interneuriche che citoneuriche) e sotto l'azione di un impulso elettrico, una sostanza individuabile nell'acetilcolina (un estere della colina). Questa viene liberata in grande quantità, quasi contemporaneamente all'impulso, e svolge la funzione di aumentare grandemente la permeabilità della membrana cellulare in corrispondenza della giunzione. Sono state infatti osservate riduzioni della resistenza in misura superiore a 10 volte.

L'acetilcolina, rapidamente emessa, viene altrettanto rapidamente distrutta mediante idrolisi catalizzata da un enzima, la colinesterasi, presente nel sangue e nei tessuti, in conseguenza della quale il transitorio ha una durata dell'ordine di alcuni millisecondi. Pertanto la forma d'onda è ancora quella impulsiva, la cui ampiezza non supera però il livello di potenziale zero. Dopo l'impulso si osserva un breve periodo di refrattarietà, durante il quale viene distrutta tutta l'acetilcolina prodotta: in tale periodo l'azione di un altro impulso risulta inefficace.

Contrariamente a quanto avviene per i generatori dei nodi, in questo caso l'aumento di permeabilità investe tutti gli ioni e non soltanto quelli di potassio e di sodio. A sostegno di questa ipotesi, è stato osservato sperimentalmente che il potenziale di giunzione si mantiene direttamente proporzionale al potenziale di membrana, qualora questo venga artificialmente variato. Inoltre, per il potenziale di giunzione si verifica la proprietà additiva degli effetti. Quando infatti l'acetilcolina liberata non è sufficiente per provocare lo stato attivo del generatore, essa esercita egualmente la funzione di aumentare la permeabilità della membrana, per cui la rapida successione di impulsi subliminari determina l'aumento progressivo della permeabilità, fino a che la d.d.p. in corrispondenza della giunzione raggiunge il valore necessario per provocare lo stato attivo del generatore del nodo immediatamente seguente.

TECNICHE DI MISURA.

La determinazione delle proprietà elettriche passive dei materiali biologici può essere effettuata con i comuni metodi propri della tecnica elettronica. Nella gamma delle frequenze radio, dove le componenti reale ed immaginaria assumono un ordine di grandezza tra loro confrontabile, trovano impiego i normali ponti di misura, con precisioni di alcuni percento per entrambe le componenti. A partire dalla gamma U.H.F., si utilizza la tecnica delle linee di trasmissione (in particolare delle guide d'onda) e l'impedenza viene dedotta dall'analisi della propagazione

delle onde elettromagnetiche attraverso il mezzo biologico.

Le maggiori difficoltà di misura si incontrano alle basse frequenze, dove le correnti capacitive divengono molto più piccole di quelle resistive. In tal caso occorrono ponti con alto potere risolutivo, forniti di componenti reattivi aventi una calibrazione dello stesso ordine della sensibilità del sistema.

Precauzioni di altra natura devono essere prese dagli sperimentatori al fine di rendere i vari risultati tra loro confrontabili. L'impedenza dei materiali biologici varia infatti con la temperatura da essi assunta, ma soprattutto dipende dal periodo di tempo intercorso tra il momento della loro asportazione dall'organo vivente e quello della misura. In generale si è osservato che durante le prime ore dopo l'atto chirurgico l'impedenza si mantiene sensibilmente costante. Dopo questo primo periodo, sia la componente resistiva che quella reattiva diminuiscono sempre più rapidamente nel tempo. Variazioni più evidenti, consistenti soprattutto in una forte diminuzione della conduttanza, si verificano, sino dal primo istante, per i tessuti aventi normalmente un elevato contenuto di sangue, del quale l'atto chirurgico provoca una forte perdita. Pertanto, ove possibile, queste misure vengono effettuate «in situ» ed in condizioni tali da conservare al massimo lo stato normale dell'organo vivente.

L'esame dell'attività elettrica delle celle nervose e muscolari può essere suddiviso, ai fini di effettuarne un breve riassunto, in tre fasi successive: il prelievo dei potenziali di membrana e di azione, la loro registrazione, l'analisi e la classificazione dei risultati sperimentali.

Allo stato attuale della tecnica, la prima fase è quella che offre le maggiori difficoltà e la cui esecuzione, pur se corroborata da brillanti soluzioni, è ancora lungi dal risultare del tutto priva di inconvenienti. Le piccolissime dimensioni delle celle hanno reso necessaria la realizzazione di elettrodi sottilissimi, capaci di penetrare attraverso la membrana e costruiti con materiali che mantengano inalterate le loro caratteristiche elettriche anche in presenza delle sostanze biologiche con le quali possono entrare in contatto. Questi microelettrodi, aventi un diametro riducibile fino a qualche decimo di micron, sono distinguibili in due categorie: quelli metallici e quelli elettrolitici.

I primi impiegano acciaio, tungsteno e metalli nobili, tra i quali prevalentemente il platino. Il loro circuito elettrico equivalente può ritenersi costituito da una capacità e da una resistenza in serie, la prima essendo prodotta dagli inevitabili fenomeni di ossidazione e riduzione che si verificano sulla superficie dell'elettrodo e la seconda essendo costituita dalla sua stessa resistenza, che assume valori assai elevati per effetto della sezione estremamente ridotta. Questi microelettrodi si comportano pertanto come dei filtri passa-alto e sono adatti a prelevare potenziali rapidamente variabili quali sono quelli di azione. In fig. 9 è riportata la variazione con la frequenza della impedenza di un microelettrodo di platino, la cui superficie ha subito un trattamento speciale che ha fornito valori di impedenza assai bassi, specialmente nella gamma tra 1 e 100 kHz.

I microelettrodi elettrolitici sono costituiti da un tubicino di vetro, filato fino ad ottenere la sezione voluta e riempito con una soluzione salina, generalmente cloruro di potassio. Essi presentano una fortissima resistenza avente in parallelo una piccola capacità, per le quali i rispettivi valori si aggirano intorno a diverse decine di MΩ e ad alcuni pF. Il loro comportamento con la frequenza è perciò quello di un filtro passa-basso e il loro precipuo campo di impiego è il prelievo di potenziali costanti o lentamente variabili, ovvero dei potenziali di riposo.

L'apparato elettronico di amplificazione e di registrazione deve pertanto possedere delle caratteristiche stabili, oltre che dai livelli di tensione prelevati, anche

dalle proprietà dei microelettrodi con i quali il prelievo è effettuato. Con quelli metallici, già di per sè inadatti ai potenziali continui, si utilizzano amplificatori in corrente alternata che devono possedere una resistenza di ingresso molto maggiore di quella del microelettrodo. Questo metodo risulta conveniente, oltre che per l'esame dei potenziali di azione con fronti d'onda molto ripidi, anche per

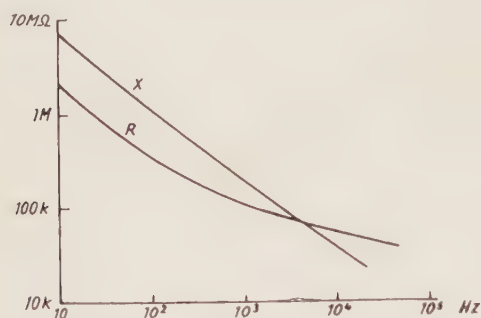


Fig. 9. — Impedenza di un microelettrodo di platino del diametro di 3μ in funzione della frequenza.

lo studio statistico dell'attività cellulare, nel qual caso, la fedeltà di riproduzione della forma d'onda non riveste una particolare importanza, mentre può essere utilmente sfruttata la costruzione relativamente più facile dei microelettrodi metallici.

Quelli elettrolitici vengono impiegati in unione ad amplificatori in corrente continua, per i quali sono stati studiati particolari accorgimenti allo scopo di correggere le distorsioni della forma d'onda prodotte da questi microelettrodi. Risultati soddisfacenti vengono offerti sia dall'equalizzazione, ottenuta introducendo tra due stadi successivi dell'amplificatore un circuito avente una funzione di trasferimento inversa a quella del circuito equivalente del microelettrodo, sia dalla neutralizzazione, che trova però un più frequente impiego grazie alla sua facilità di esecuzione e di messa a punto. Essa consiste in un circuito di reazione capacitivo (fig. 10) con il quale si ottiene una capacità d'ingresso $C_i = C_r (1 - A)$. Se l'amplificazione A è positiva e maggiore dell'unità, C_i assume il segno negativo ed un valore che, agendo su C_r , può neutralizzare quasi completamente la capacità del microelettrodo.

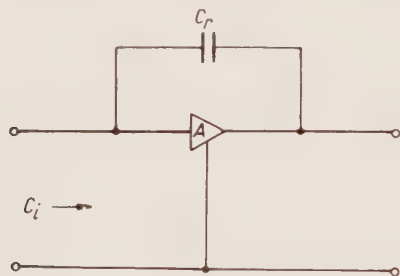


Fig. 10. — Amplificatore neutralizzato per la compensazione della capacità del microelettrodo

L'elevata resistenza interna del conduttore elettrolitico, per effetto della quale i tessuti attivi verrebbero a comportarsi come generatori di corrente, impone a questi amplificatori una resistenza d'ingresso eccezionalmente grande. Per realizzare questo requisito concorrono l'impiego di tubi preamplificatori elettrometrici, l'introduzione di forti reazioni negative e tecniche di montaggio appositamente studiate.

Particolari cure devono essere poste anche per contenere il livello di rumore entro valori accettabili in rela-

zione al segnale d'ingresso. Il rumore termico dei microelettrodi può infatti raggiungere valori apprezzabili; inoltre, tanto l'equalizzazione che la neutralizzazione tendono ad aumentare il rumore proprio degli amplificatori. In alcuni casi è perciò necessario limitare la risposta di frequenza che, per le caratteristiche delle forme d'onda prelevate, deve al massimo coprire la banda tra 0 e 50 kHz.

L'influenza delle interferenze esterne viene combattuta sia con un accurato schermaggio, sia con l'introduzione di stadi amplificatori aventi un certo rapporto di discriminazione tra i segnali in controfase e quelli in fase. Tuttavia, nel caso delle misure intracellulari, dove i segnali sono relativamente elevati, il problema non è molto grave e sono sufficienti valori di discriminazione di alcune decine. Per misure extracellulari, nelle quali i segnali osservati si riducono a pochi millivolt, occorrono invece discriminazioni superiori a 1000.

La registrazione propriamente detta dei segnali opportunamente amplificati viene effettuata sia mediante l'impiego combinato di oscilloscopi e camere cinematografiche, sia su nastro magnetico. Nei casi dove abbiano interesse fenomeni variabili non molto rapidamente, si può ancora fare ricorso alla registrazione con penna scrivente su carta.

Un recente perfezionamento della tecnica di registrazione degli impulsi nervosi è stato introdotto da alcuni ricercatori, grazie ai valori di alcune migliaia di MΩ ottenibili per la resistenza d'ingresso degli amplificatori con i mezzi sopra indicati. Essa risulta infatti notevolmente superiore anche alla resistenza trasversale dello strato mielino del cilindrase (poche centinaia di MΩ per 1 mm di lunghezza) e si è perciò tentato, con esito assai brillante, di utilizzare la conduzione trasversale del cilindrase per registrare i potenziali presenti nel suo interno. Questi procedimenti eliminano l'impiego dei microelettrodi, i quali, oltre ad essere di difficile costruzione e di manipolazione delicata, causano sempre un'alterazione dello stato originale della fibra.

Accanto agli strumenti di amplificazione e di registrazione devono essere ricordate alcune apparecchiature ausiliarie, soprattutto i generatori di stimoli elettrici che vengono impiegati per evocare artificialmente i potenziali di azione.

La fase di analisi e classificazione dei risultati sperimentali costituisce un campo dove l'elettronica svolge ancora un'attività embrionale che nel momento attuale risulta diretta più specificatamente a scopi di diagnosi medica. Tuttavia l'impiego delle apparecchiature elettroniche di calcolo offre grandi possibilità anche nel campo elettrofisiologico, non solo per permettere ai ricercatori un sostanziale risparmio di tempo, ma anche per fornire ad essi indicazioni per ulteriori ricerche. A questo proposito, va ricordata la determinazione della correlazione esistente tra lo stato fisiologico della cellula e la configurazione dei potenziali da essa assunti, tuttora incerta e frammentaria. Per questo e per altri scopi analoghi, si richiede la determinazione statistica di ampiezze, durate e frequenze di ripetizione degli impulsi nervosi. In queste ricerche, gli elaboratori elettronici di calcolo consentono di individuare rapidamente gli elementi caratteristici di un tracciato, sottraendo nel contempo l'interpretazione di esso ad un giudizio soggettivo.

CONCLUSIONI.

La tecnica elettronica soddisfa attualmente i principali requisiti imposti, nella ricerca elettrofisiologica, dalle proprietà elettriche dei materiali biologici studiati, proprietà delle quali si è qui dato un breve riassunto. La severità di questi requisiti è imputabile soprattutto ai bassi livelli delle tensioni generate, alle alte impedenze dei sistemi di prelievo e alla presenza di grandezze rapidamente variabili sovrapposte ad altre di valore costante.

Tuttavia, per molte ricerche specifiche, l'attrezzatura elettronica si rivela ancora insufficiente, mentre, al contrario, si nota l'esistenza di apparecchiature delle quali non è ancora molto conosciuto l'uso proficuo che di esse può farsi in elettrofisiologia. Si sono ricordati, a tale proposito, i calcolatori elettronici che permetteranno di sviluppare lo studio di molti fenomeni su base statistica.

E infine augurabile una collaborazione sempre più stretta fra gli studiosi delle diverse discipline tra loro legate dalla natura stessa dei fenomeni e dalla tecnica richiesta per il loro esame.

Manoscritto pervenuto il 19 dicembre 1960.

BIBLIOGRAFIA

I) SU ARGOMENTI GENERALI.

- C. J. F. BOTTCHE: *Theory of electric polarization*. - Elsevier Press, Houston, Tex., 1952.
C. P. SMYTH: *Dielectric behaviour and structure*. - Mc Graw-Hill, New York, 1955.
T. SHEDLOVSKY (Ed.): *Electrochemistry in biology and medicine*. J. Wiley, New York, 1955.
J. C. ECCLES: *The physiology of nerve cells*. - Hopkins University Press, Baltimore, 1957.
AUTORI VARI: *Advances in biological and medical Physics*. - Academic Press Inc., New York, 1957.
F. TESTONI: *Corso di Elettrofisiologia*. Roma, 1959.
R. NENCINI: *Introduzione alla psicofisiologia*. - Ed. Org. Spec., Firenze, 1959

II) SULLE PROPRIETÀ PASSIVE.

- H. FRICKE: *A mathematical treatment of electric conductivity and capacity of disperse systems*. - « Phys. Rev. », vol. 26, nov. 1925, pag. 678.
E. BOZLER, K. S. COLE: *Electrical impedance and phase angle of muscle in rigor*. - « J. Cellular and Comp. Physiol. », vol. 6, giugno 1935, pag. 229.
J. L. ONCLEY: *The investigation of proteins by dielectric measurements*. - « Chem. Rev. », vol. 30, giugno 1942, pag. 433.
K. S. COLE: *Impedance of single cells*. *Tabulae Biologicae (Cellula)*, vol. 19, 1942, pag. 24.
A. J. RUTGERS, M. DE SMET: *Electrosmosis, streaming potentials and surface conductance*. - « Trans. Faraday Soc. », vol. 43, marzo 1947, pag. 729.
I. TASAKI: *New measurements of the capacity and the resistance of the myelin sheath and the nodal membrane of the isolated frog nerve fiber*. - « Am. J. Physiol. », vol. 181, giugno 1955, pag. 639.
H. P. SCHWAN, E. L. CARITENSEN: *Dielectric properties of the membrane of lysed erythrocytes*. - « Science », vol. 125, maggio 1957, pag. 985.
H. P. SCHWAN: *Alternating current spectroscopy of biological substances*. - « P.I.R.E. », vol. 47, novembre 1959, pag. 1841.

III) SULLE PROPRIETÀ ATTIVE.

- G. L. BROWN: *Action potentials of normal mammalian muscle*. - « J. Physiol. », vol. 89, 1937, pag. 220.
G. L. BROWN: *Transmission at nerve endings by acetylcholine*. - « Physiol. Rev. », vol. 17, 1937, pag. 485.
J. C. ECCLES: *Synaptic and neuromuscular transmission*. - « Physiol. Rev. », vol. 17, 1937, pag. 538.
A. L. HODGKIN, A. F. HUXLEY: *Action potentials recorded from inside a nerve fibre*. - « Nature », vol. 140, 1939, pag. 710.
J. C. ECCLES, S. W. KUFFLER: *Initiation of muscle impulses at neuromuscular junctions*. - « J. Neurophysiol. », vol. 4, 1941, pag. 402.

- B. KATZ: *The electrical properties of the muscle fibre membrane*. - « Proc. Roy. Soc. », B, vol. 135, 1948, pag. 506.
M. H. DRAPER, S. WEIDMANN: *Cardiac resting and action potentials recorded with an intracellular electrode*. - « J. Physiol. », vol. 115, 1951, pag. 74.
P. FATT, B. KATZ: *An analysis of the end-plate potential recorded with an intracellular electrode*. - « J. Physiol. », vol. 115, 1951, pag. 320.
A. L. HODGKIN: *The ionic basis of electrical activity in nerve and muscle*. - « Biol. Rev. », vol. 26, 1951, pag. 339.
P. FATT, B. KATZ: *Spontaneous subthreshold activity at motor nerve endings*. - « J. Physiol. », vol. 117, 1952, pag. 109.
W. L. NASTUK: *The electrical activity of single muscle fibres*. « J. Cell. Comp. Physiol. », vol. 42, 1953, pag. 249.
J. TASAKI: *Nervous transmission*. - C. Thomas, Springfield, 1953.
H. GRUNDFEST: *The nature of the electrochemical potentials of bioelectric tissues*. - « Electrochemistry in Biology and Medicine », New York, 1955, pag. 141.
F. H. SHAW, S. E. SIMON: *The nature of the sodium and potassium balance in nerve and muscle*. - « Aust. J. Exp. Biol. », vol. 33, 1955, pag. 153.
I. A. BOYD, A. R. MARTIN: *The end-plate potential in mammalian muscle*. - « J. Physiol. », vol. 132, 1956, pag. 74.
J. C. ECCLES: *The physiology of nerve cells*. - Hopkins University Press, Baltimore, 1957.
G. HOYLE: *Comparative physiology of the nervous control of muscular contraction*. - Cambridge University Press, Cambridge, 1957.
A. L. HODGKIN: *Ionic movements and electrical activity in giant nerve fibers*. - « Proc. Roy. Soc. », B, vol. 148, gennaio 1958, pag. 1.
W. H. JR. FREYGANG: *Some functions of nerve cells in terms of an equivalent network*. - « P.I.R.E. », vol. 47, 1959, nov., pag. 1862.
R. S. MACKAY: *What is a nerve?* - « I.R.E. Trans. », vol. ME-7, aprile 1960, pag. 94.

IV) SULLE TECNICHE DI MISURA.

- A. F. HUXLEY, R. STAMPFLI: *Direct determination of membrane resting potential and action potential in single myelinated nerve fibers*. - « J. Physiol. », vol. 112, 1951, pag. 476.
G. SVAETICHIN: *Low resistance microelectrodes*. - « Acta Physiol. Scand. », vol. 24, suppl. 86, 1951, pag. 5.
J. T. ALEXANDER, W. L. NASTUK: *An instrument for the production of microelectrodes used in electrophysiological studies*. - « Rev. Scient. Instr. », vol. 24, luglio 1953, pag. 528.
R. M. DOWBEN, J. E. ROSE: *A metal-filled microelectrode*. - « Science », vol. 118, 3 luglio 1953, pag. 22.
K. S. COLE, H. A. ANTOSIEWICZ, P. RABINOWITZ: *Automatic computation of nerve excitation*. - « J. Soc. Ind. Appl. Math. », vol. 3, settembre 1955, pag. 153.
I. TASAKI: *New measurements of the capacity and the resistance of the myelin sheath and the nodal membrane of the isolated frog nerve fiber*. - « Am. J. Physiol. », vol. 181, giugno 1955, pag. 639.
I. TASAKI, K. FRANK: *Measurement of the action potential of myelinated nerve fiber*. - « Amer. J. Physiol. », vol. 182, settembre 1955, pag. 572.
B. FRANKENHAUSER: *A method for recording and action potentials in the isolated myelinated nerve fiber of the frog*. - « J. Physiol. », vol. 135, 1957, pag. 550.
E. AMATNIEK: *Measurement of bioelectric potentials with microelectrodes and neutralized input capacity amplifiers*. - « I.R.E. Trans. », vol. ME-10, marzo 1958, pag. 3.
J. Y. LETTVIN, B. HOWLAND, R. C. GESTELAND: *Footnotes on a headstage*. - « I.R.E. Trans. », vol. ME-10, marzo 1958, pag. 26.
J. W. MOORE, J. DEL CASTILLO: *An electronic electrode*. - « 1959 I.R.E. National Conv. Rec. », pt. 9, pag. 47.
R. W. GESTELAND, B. HOWLAND, J. Y. LETTVIN, W. H. PITTS: *Comments on microelectrodes*. - « P.I.R.E. », vol. 47, novembre 1959, pag. 1856.
J. W. MOORE: *Electronic control of some active bioelectric membranes*. « P.I.R.E. », vol. 47, novembre 1959, pag. 1867

MODELLO ANALOGICO PER LA RICERCA AUTOMATICA DEGLI AUTOVALORI RELATIVI AD UNA NOTEVOLE CATEGORIA DI EQUAZIONI DIFFERENZIALI

G. BASILE (*)

Il problema della ricerca degli autovalori di una equazione differenziale di secondo ordine con condizioni ai limiti omogenee, che interviene nella trattazione analitica di diversi fenomeni fisici, viene risolto mediante l'analogia con un sistema elettrico a reazione, che si trova in equilibrio in corrispondenza a determinati valori assunti da una certa tensione-parametro.

Lo studio dell'equilibrio del sistema viene ricondotto a quello di una equazione alle differenze finite, risolubile mediante un procedimento grafico noto.

A conferma della teoria esposta vengono infine riportati alcuni risultati sperimentali.

1. - PREMESSA.

La ricerca degli autovalori di una equazione differenziale presenta grande interesse in taluni problemi tecnici, come, p. es., nello studio delle frequenze proprie di sistemi vibranti e nel calcolo delle velocità critiche di alberi rotanti.

La determinazione sperimentale di tali autovalori può essere effettuata con metodi analogici, sia per tentativi mediante una calcolatrice di tipo generale [4], sia in maniera automatica, mediante un particolare modello, di tipo ripetitivo, dotato di un opportuno circuito di reazione [5]. Quest'ultima soluzione, senza altro preferibile alla prima, non risulta che sia stata trattata in modo esauriente e generale con particolare riguardo alla stabilità. Lo studio viene limitato in questa nota al «problema di Sturm Liouville» che, come è noto [1], tratta equazioni differenziali omogenee di secondo ordine, associate a condizioni ai limiti omogenee. A tale problema si riconduce la trattazione analitica di diversi fenomeni fisici.

In un secondo tempo si conta di generalizzare il metodo applicandolo alla soluzione di equazioni differenziali di ordine superiore al secondo. In particolare si studierà un modello per la determinazione delle velocità critiche di un albero a profilo qualunque.

Quest'ultimo problema come è noto, comporta la ricerca degli autovalori di una equazione differenziale del quarto ordine.

2. - RICHIAMI SUGLI AUTOVALORI.

Si consideri l'equazione differenziale lineare ed omogenea del secondo ordine:

$$(1) \quad \frac{d^2 y}{dt^2} + f(\lambda, t) y = 0$$

la quale, come è noto, può derivarsi con opportune posizioni dall'equazione di secondo ordine, omogenea e lineare nella forma più generale della precedente:

$$(2) \quad A(x) \frac{d^2 Y}{dx^2} + B(x) \frac{dY}{dx} + C(\lambda, x) Y = 0,$$

(*) Collaboratore del Centro di studio per l'elettronica e le telecomunicazioni del C.N.R. - Università di Bologna.

nella quale il coefficiente C è funzione di un parametro λ , oltre che della variabile indipendente x , ed $Y = Y(x)$ è la funzione incognita.

Si pongano le condizioni ai limiti:

$$(3) \quad \begin{aligned} h_1 y(a) + k_1 y'(a) &= 0 \\ h_2 y(b) + k_2 y'(b) &= 0, \end{aligned}$$

dove a e b rappresentano gli estremi dell'intervallo in cui varia t , mentre h_1, k_1 , ed h_2, k_2 sono costanti assegnate ad arbitrio con la sola condizione che sia:

$$(h_1^2 + k_1^2) \times (h_2^2 + k_2^2) \neq 0.$$

Si può dimostrare [1] che, se $f(\lambda, t)$ è una funzione continua e crescente di λ in un certo intervallo (λ_1, λ_2) e si ha uniformemente:

$$\begin{aligned} \lim_{\lambda \rightarrow \lambda_1} f(\lambda, t) &= -\infty \\ \lim_{\lambda \rightarrow \lambda_2} f(\lambda, t) &= +\infty, \end{aligned}$$

esiste una successione crescente di valori di λ :

$$\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_k \dots$$

(autovalori), appartenenti all'intervallo (λ_1, λ_2) , solo per i quali esistono soluzioni non nulle della (1) soddisfacenti alle condizioni (3).

Tali soluzioni, che indicheremo con

$$y_0, y_1 \dots y_k \dots$$

e che si chiamano autofunzioni, sono determinate a meno di un fattore costante.

L'arbitrarietà si può eliminare, ad esempio, imponendo la condizione che le autofunzioni siano normalizzate nell'intervallo (a, b) , oppure altre condizioni, come vedremo nel seguito.

Si può dimostrare che l'autofunzione corrispondente a $\lambda = \lambda_k$ si annulla k volte, sempre nell'intervallo (a, b) .

Nel seguito, facendo riferimento ad equazioni del tipo (1), porremo:

$$a = 0$$

$$b = T$$

3. - DESCRIZIONE E FUNZIONAMENTO DEL MODELLO.

Ciò premesso, consideriamo l'equazione differenziale (1), che qui ripetiamo:

$$(4) \quad y'' + f(\lambda, t) y = 0$$

con le condizioni ai limiti

$$(5) \quad h_1 y(0) + k_1 y'(0) = 0$$

$$(6) \quad h_2 y(T) + k_2 y'(T) = 0$$

ed eliminiamo l'arbitrarietà nella determinazione delle autofunzioni, imponendo l'ulteriore condizione:

$$(7) \quad y'(0) = E$$

Per ragioni evidenti chiameremo « condizioni iniziali » la (5) e la (7).

La determinazione degli autovalori relativi al problema posto può effettuarsi mediante un circuito elettrico, di cui in fig. 1 è riportato lo schema a blocchi. Esso comprende un solutore analogico della equazione

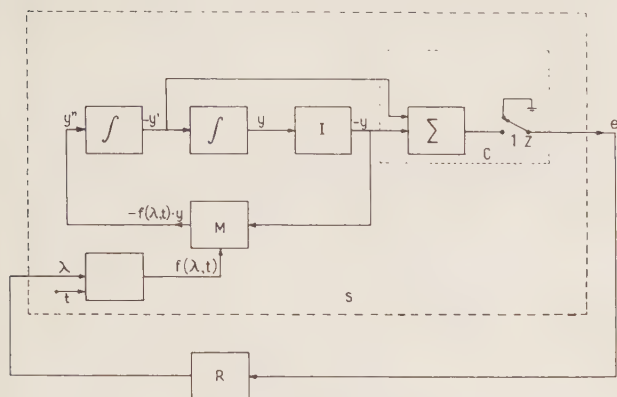


Fig. 1.

(4), indicato con S , ed una rete di reazione costituita dal circuito R . Il funzionamento del sistema è ripetitivo, di periodo T .

Il circuito C effettua la combinazione lineare

$$(8) \quad h_2 y(t) + k_2 y'(t)$$

e ne fornisce i valori corrispondenti agli istanti finali di ogni periodo di calcolo, mediante la chiusura del contatto z , il quale rimane in posizione 1 per un tempo τ_1 trascurabile rispetto a T .

La tensione $e(t)$ di uscita del circuito C ha quindi la forma rappresentata in fig. 2.

Essa viene applicata al circuito R il quale è costituito in modo tale che la sua tensione di uscita λ , costante per tutto il periodo di calcolo, viene modificata con una

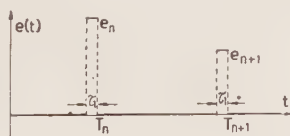


Fig. 2. — Tensione di uscita del circuito C.

determinata legge alla fine del periodo stesso, per effetto del valore non nullo della tensione $e(t)$.

Per semplicità porremo:

$$e(T_n) = e_n.$$

Per fare l'esame del funzionamento del circuito supponiamo di eseguire il primo calcolo imponendo le condizioni iniziali (5) e (7), mediante opportune commutazioni di contatti, ed assumendo per λ un valore arbitrario $\lambda^{(1)}$. Al termine del periodo, la (6) non risulterà in generale soddisfatta; si avrà cioè:

$$h_2 y(T) + k_2 y'(T) = e_1 \neq 0.$$

La tensione e_1 , che si può chiamare errore del primo periodo di calcolo, agendo sul circuito R , determina una variazione $\Delta\lambda = K e_1$ del valore $\lambda^{(1)}$ assunto inizialmente per il parametro λ . Il coefficiente K rappresenta il grado di reazione del sistema.

Il secondo calcolo viene pertanto compiuto con un valore del parametro:

$$\lambda^{(2)} = \lambda^{(1)} + K e_1,$$

sempre a partire dalle condizioni iniziali (5) e (7) e conduce ad un nuovo errore e_2 .

In generale, con riferimento al periodo di calcolo n^{mo} , si avrà:

$$(9) \quad \lambda^{(n)} = \lambda^{(n-1)} + K e_{n-1}.$$

L'errore e è funzione di λ :

$$(10) \quad e = \psi(\lambda),$$

e poichè deve risultare un errore nullo solo per $\lambda^{(n)}$ coincidente con un autovalore λ_k , si ha la condizione:

$$(11) \quad \psi(\lambda_k) = 0 \quad (k = 0, 1, \dots).$$

Tenendo presente la (10), la (9) diventa:

$$(12) \quad \lambda^{(n)} = \lambda^{(n-1)} + K \psi(\lambda^{(n-1)}).$$

Nota la funzione $\psi(\lambda)$, assegnando a $\lambda^{(n-1)}$ un valore qualsiasi, la (12) fornisce subito il valore di $\lambda^{(n)}$. Si ottiene così una successione di valori di λ che rappresenta una soluzione della equazione alle differenze finite (12).

Se tale successione converge, da un certo n in poi deve risultare:

$$|\lambda^{(n+1)} - \lambda^{(n)}| < \varepsilon,$$

essendo ε un numero piccolo a piacere; deve essere cioè:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} K \psi(\lambda^{(n)}) = 0.$$

Tenendo presente la (11) si vede immediatamente che la successione può ammettere come limite soltanto uno degli autovalori λ_k ($k = 0, 1, \dots$).

Si tratta ora di ricavare le condizioni di convergenza della successione di cui sopra; se tali condizioni si possono soddisfare, il modello proposto risulta evidentemente utilizzabile per la determinazione sperimentale degli autovalori.

Si può limitare lo studio ad un intorno di un autovalore λ_k senza ledere la generalità, in quanto la condizione di convergenza di una successione è sufficiente che sia soddisfatta da un certo valore di n in poi.

Ciò significa in pratica che, quando siano soddisfatte le condizioni di convergenza che ora ricaveremo, la successione converge certamente, purchè il valore iniziale $\lambda^{(1)}$ cada nell'intorno suddetto.

Si può allora linearizzare l'equazione (12) ponendo:

$$\lambda^{(n)} = (1 + \varepsilon_n) \cdot \lambda_k,$$

essendo ε_n un numero sufficientemente piccolo.

La (12) diviene quindi:

$$(13) \quad \lambda_k (1 + \varepsilon_n) = \lambda_k (1 + \varepsilon_{n-1}) + K \cdot \psi[\lambda_k (1 + \varepsilon_{n-1})].$$

D'altra parte, sviluppando in serie la ψ , (v. Appendice), si ha:

$$\psi[(1 + \varepsilon_{n-1}) \lambda_k] = \psi(\lambda_k) + \varepsilon_{n-1} \cdot \lambda_k \cdot \psi'(\lambda_k) + \dots$$

e quindi, ricordando che $\psi(\lambda_k) = 0$ e trascurando le potenze di ε_{n-1} successive alla prima, la (13) diventa:

$$(14) \quad \varepsilon_n = [1 + K \cdot \psi'(\lambda_k)] \varepsilon_{n-1}.$$

Dalla (14) deriva immediatamente:

$$(15) \quad \varepsilon_n = [1 + K \cdot \psi'(\lambda_k)]^{n-1} \cdot \varepsilon_1.$$

Dalla quale risulta evidente che la successione $\lambda^{(n)}$ converge a λ_k , se è soddisfatta la diseuguaglianza

$$(16) \quad |1 + K \psi'(\lambda_k)| < 1.$$

La (16) equivale alla doppia disuguaglianza:

$$(I7) \quad -2 < K \cdot \psi'(\lambda_k) < 0.$$

Si vede inoltre che se è

$$-1 < K \cdot \psi'(\lambda_k) < 0,$$

la successione delle $\lambda^{(n)}$ tende a λ_k in maniera monotona, poichè gli scarti ε_n sono tutti dello stesso segno. Quando invece

$$-2 \leq K \cdot \psi'(\lambda_k) \leq -1,$$

gli ε_n sono alternativamente negativi e positivi, e quindi i termini della successione $\lambda^{(n)}$ tendono a λ_k oscillando.

È chiaro che scegliendo opportunamente il segno ed il valore assoluto del grado di reazione K è sempre possibile rendere soddisfatta la condizione di convergenza (17).

Resta così provato che con il modello in esame si possono determinare tutti gli autovalori, assumendo un opportuno valore iniziale $\lambda^{(1)}$ della tensione λ .

La successione $\lambda^{(1)}, \lambda^{(2)}, \dots$, si può anche studiare mediante la costruzione grafica che verrà illustrata qui di seguito.

Assumendo per la funzione $\psi(\lambda)$ un andamento del tipo 1 riportato in fig. 3 (v. Appendice), in cui si è sup-

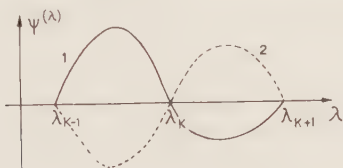


Fig. 3. — Possibili andamenti della funzione $\psi(\lambda)$.

posto $\psi'(\lambda_k) < 0$, la equazione (12) si può risolvere con la costruzione grafica di fig. 4.

Riportando in ascisse i valori di λ , si traccia la retta

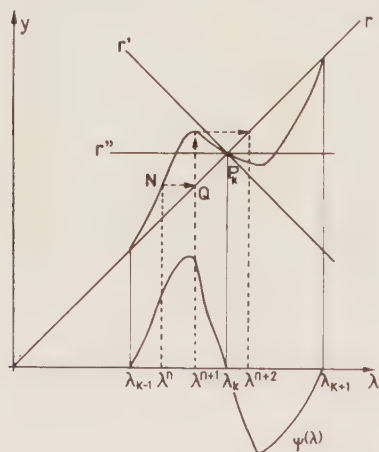


Fig. 4.

r di equazione $y = \lambda$ e la curva $y = \lambda + K \psi(\lambda)$, scegliendo per K un valore positivo.

Dal valore generico $\lambda^{(n)}$ di λ , compreso nell'intervallo $\lambda_{k-1}, \lambda_{k+1}$, si ricava λ^{n+1} nel modo seguente: si conduce per $\lambda^{(n)}$ una parallela all'asse delle ordinate che interseca la curva $\lambda + K \psi(\lambda)$ nel punto N la cui ordinata è $y = \lambda^{(n)} + K \psi(\lambda^{(n)}) = \lambda^{(n+1)}$. Si manda quindi per N una parallela all'asse delle ascisse che interseca la retta r nel punto Q , la cui ascissa è evidentemente eguale al valore $\lambda^{(n+1)}$ cercato.

Ripetendo le operazioni risulta evidente che la successione $\lambda^{(n)}$ converge certamente a λ_k se, da un certo n in poi viene interessato un intorno di λ_k , nel quale la

curva $\lambda + K\psi(\lambda)$ per $\lambda < \lambda_k$ e per $\lambda > \lambda_k$, rispettivamente, giace da bande opposte rispetto alla perpendicolare mandata per P_k alla retta r ; il che equivale alla condizione

$$-2 < K \psi'(\lambda_k) < 0.$$

È ovvio che riducendo opportunamente il valore di K ci si può sempre ricondurre ad una tale situazione.

Si vede infine che la successione converge in maniera monotona al limite λ_k se, almeno in un intorno di λ_k la curva $\lambda + K\psi(\lambda)$ giace da bande opposte rispetto alla parallela all'asse delle ascisse passante per P_k , il che equivale alla condizione più restrittiva della precedente;

$$-1 < K \psi'(\lambda_k) < 0.$$

La fig. 5 mostra la possibilità di esistenza di « soluzioni periodiche » della equazione (12); in tal caso, la successione è oscillante ed ammette come massimo e minimo limite rispettivamente λ'' e λ' .

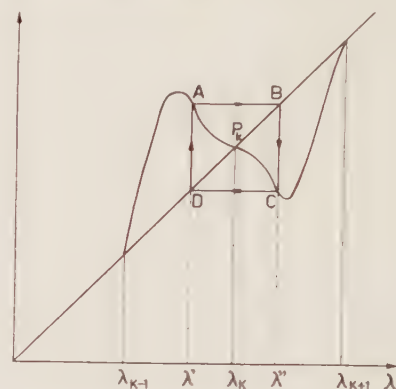


Fig. 5. — Esempio di soluzione periodica a due valori.

Affinchè sia possibile il verificarsi di tale situazione, è necessario che esistano due punti della curva $\lambda + K\psi(\lambda)$ (punti A e C di fig. 5) giacenti su una retta r^* perpendicolare alla r , da bande opposte rispetto alla retta r , ed equidistanti dal punto di intersezione di r ed r^* . Ciò è escluso, evidentemente, se, per tutto l'intervallo $(\lambda_{k-1}, \lambda_{k+1})$, la curva $\lambda + K\psi(\lambda)$, per $\lambda < \lambda_k$ e per $\lambda > \lambda_k$ rispettivamente, giace da bande opposte rispetto alla perpendicolare condotta per P_k alla retta r . Il che equivale ad una condizione più restrittiva della (17) che si riferisce solo ad un intorno di λ_k .

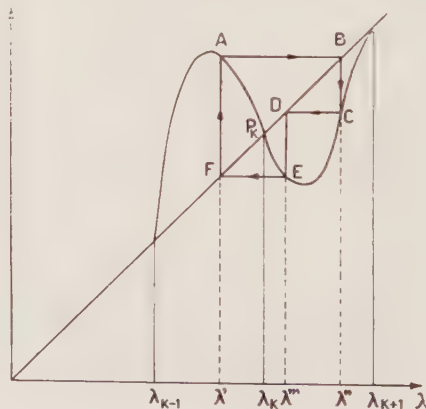


Fig. 6. — Esempio di soluzione periodica a tre valori.

Sono possibili anche soluzioni periodiche di tipo più complesso, cioè terne, quaterne, ... m^{le} di valori periodici di $\lambda^{(n)}$. In fig. 6 si mostra la possibilità di esistenza di una soluzione periodica a tre valori.

Situazioni formalmente analoghe si incontrano nello studio della sincronizzazione delle oscillazioni di rilassamento mediante impulsi [2].

4. - ESEMPIO DI APPLICAZIONE.

A titolo di esempio è stato realizzato un circuito per la ricerca degli autovalori della equazione differenziale

$$(18) \quad y'' + \lambda y = 0$$

con le condizioni ai limiti

$$\begin{aligned} (19) \quad & y(0) = 0 \\ & y(T) = 0, \end{aligned}$$

alle quali si è aggiunta, per le ragioni già esposte in precedenza, l'ulteriore « condizione iniziale »

$$(20) \quad \gamma'(0) = E.$$

Di tale equazione sono ben noti gli autovalori

$$\lambda_k = \left[(k + 1) \frac{\pi}{T} \right]^2 \quad (k = 0, 1, 2, \dots)$$

ed è quindi agevole effettuare un controllo del metodo.

Tenuto conto delle (19), l'espressione dell'errore relativo all'ennesimo periodo di calcolo diventa:

$$e_n = \gamma(T_n)$$

Inoltre è molto semplice ricavare esplicitamente la forma della funzione $e_n = \psi(\lambda^{(n)})$, integrando la (18) e tenendo presente la prima delle (19) e la (20).

Si ottiene subito:

$$(2I) \quad e_n = \frac{E}{\sqrt{\lambda^{(n)}}} \operatorname{sen} \sqrt{\lambda^{(n)}} \cdot T$$

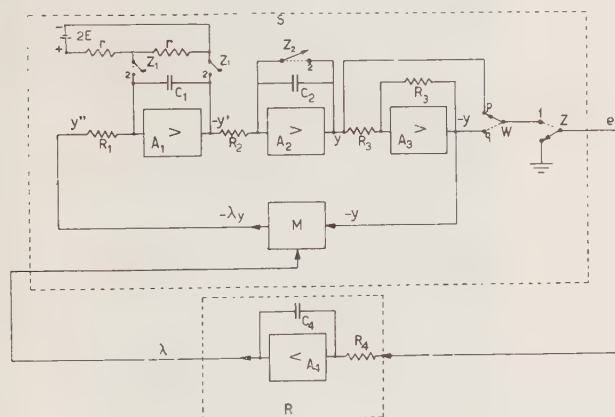


Fig. 7. — Circuito impiegato per la soluzione della equazione (18).

e pertanto la condizione (17), ricordando che
 $\text{sen } \sqrt{\lambda_r} T = 0$, si traduce nella:

$$(22) \quad -2 < \frac{TKE}{2\lambda_k} \cos \sqrt{\lambda_k} T < 0.$$

Poichè risulta $\cos \sqrt{\lambda_k} T = \pm 1$, col segno $-$ o $+$ a seconda che si tratti di un autovalore di ordine pari o di ordine dispari, si può senz'altro affermare che, per valori positivi del grado di reazione il circuito è in equilibrio stabile nell'intorno di un autovalore pari; per $K < 0$, invece, è stabile nell'intorno di un auto-

valore dispari. Resta inteso, naturalmente, che il valore assoluto di K deve essere opportunamente scelto.

Lo schema del circuito è riportato in fig. 7.

I blocchi A_1, A_2, A_3, A_4 , rappresentano degli amplificatori operazionali, mentre M è un moltiplicatore.



Fig. 8.

I contatti z_1 e z_2 sono chiusi (posizione 2) durante un intervallo di tempo τ_2 successivo a τ_1 e, come questo, molto piccolo rispetto a T .

La posizione dei contatti z , z_1 e z_2 indicata in fig. 7

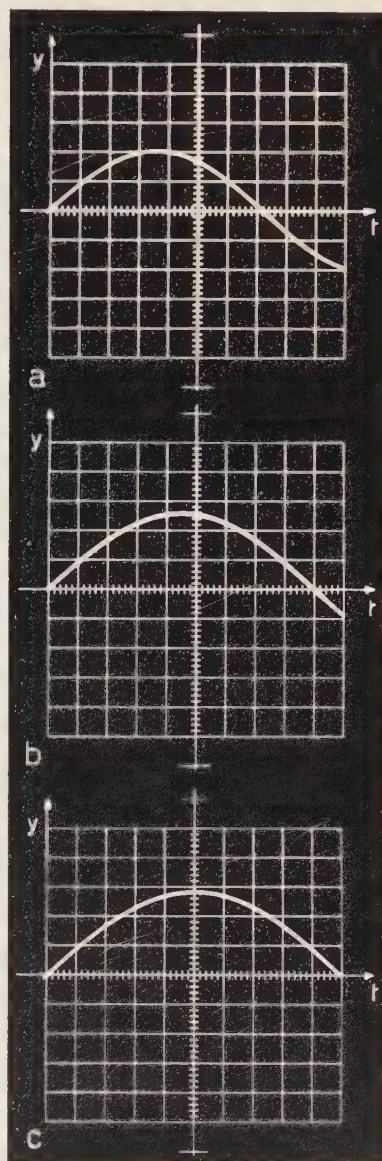


Fig. 9 *a, b, c.* — Scala orizzontale: 1 cm = 1 sec.

corrisponde all'assenza di eccitazione dei rispettivi relè.

La fig. 8 mostra come si succedono nel tempo il periodo di calcolo T_c e gli intervalli τ_1 e τ_2 .

Poichè τ_1 e τ_2 valgono circa $10^{-3} T_c$, si può considerare con ottima approssimazione $T_c = T$.

La posizione dei contatti z_1 e z_2 nell'intervallo di tempo τ_2 che precede ogni periodo di calcolo fa sì che vengano inserite nel circuito S le condizioni iniziali

$$y(0) = 0 \quad y'(0) = E.$$

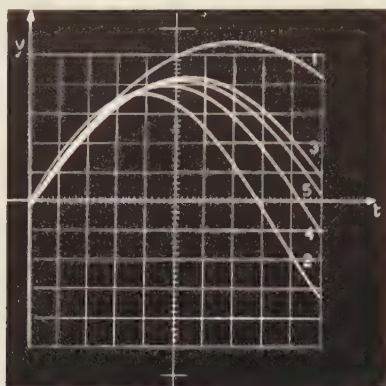


Fig. 10. — Scala orizzontale: 1 cm = 1 sec.

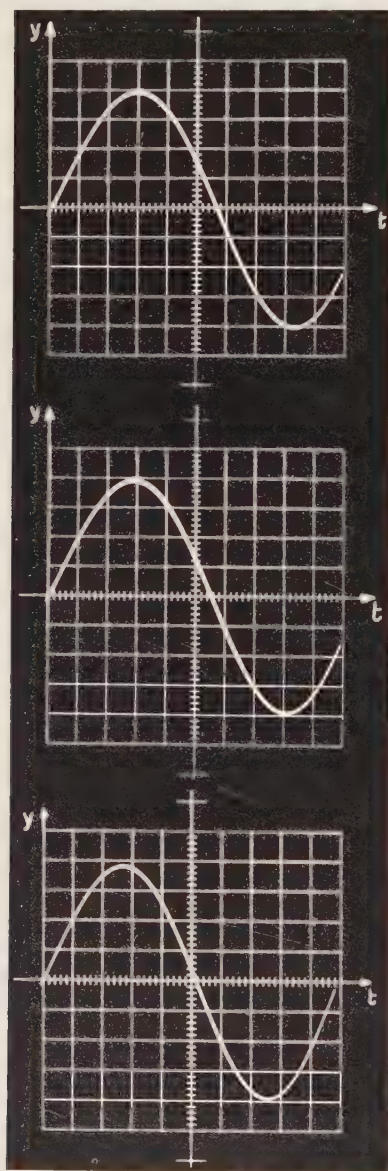


Fig. 11 a, b, c. — Scala orizzontale: 1 cm = 1 sec.

Per sommare al valore $\lambda^{(n)}$ corrispondente al calcolo

n^{mo} , l'incremento $K e_n$, viene utilizzato l'integratore A_4 , che costituisce il circuito di reazione.

Questo circuito, alimentato dalla tensione $e = e(t)$ rappresentata in fig. 2, determina una variazione della tensione λ , proporzionale al valore non nullo della tensione $e(t)$, alla fine di ogni periodo di calcolo.

Il grado di reazione è espresso da

$$(23) \quad K = \pm \frac{\tau_1}{R_4 C_4}$$

con il segno $-$ o $+$ a seconda che il commutatore W sia in posizione p o q (fig. 7).

Dalla (23) risulta evidente come si deve agire per variare comunque tale grado di reazione.

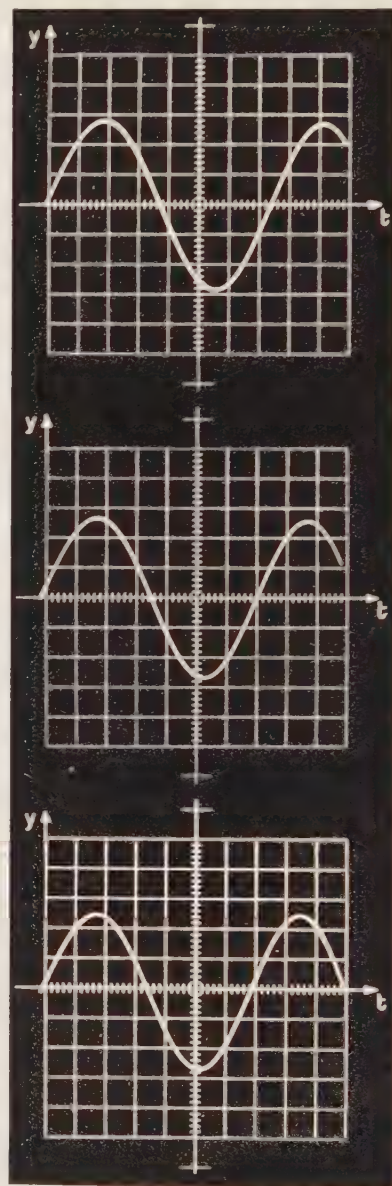


Fig. 12 a, b, c. — Scala orizzontale: 1 cm = 1 sec.

Per stabilire il valore iniziale $\lambda = \lambda^{(1)}$, basta che il condensatore C_4 abbia carica opportuna all'inizio del primo periodo di calcolo (il relativo circuito di carica è stato ommesso nella fig. 7).

La determinazione sperimentale degli autovalori procede come segue: fissato $K > 0$, si effettua una serie di calcoli con valori di $\lambda^{(1)}$ crescenti da zero fino

al massimo valore di λ che interessa. Ciascun calcolo condurrà ad una situazione stabile nell'autovalore di ordine pari più prossimo a $\lambda^{(1)}$. Si determinano così tutti gli autovalori di ordine pari compresi nell'intervallo considerato.

In maniera analoga, con $K < 0$, si determinano gli autovalori di ordine dispari.

A titolo di esempio riportiamo ora alcuni oscillogrammi che illustrano le modalità secondo cui vengono raggiunte le condizioni di equilibrio, che corrispondono ai diversi autovalori.

Le figg. 9 a, b, c mostrano tre successive forme di onda della y , che conducono alla determinazione di $\lambda_0 = \left(\frac{\pi}{T}\right)^2$, a partire da un valore $\lambda^{(1)} > \lambda_0$ ed in condizioni tali da avere una successione e_n decrescente con legge monotona.

Nella fig. 10 sono riportate, sovrapposte, alcune forme d'onda relative al calcolo di λ_0 , ottenute a partire da un valore di $\lambda^{(1)}$ inferiore a λ_0 ed in condizioni tali da dare luogo ad oscillazioni smorzate di e_n .

Infine gli oscillogrammi delle figg. 11 e 12 riproducono analoghe forme d'onda di y , quali si ottengono nella determinazione di $\lambda_1 = \left(2 \frac{\pi}{T}\right)^2$ e di $\lambda_2 = \left(3 \frac{\pi}{T}\right)^2$, rispettivamente, a partire da un valore di $\lambda^{(1)}$ minore di λ_1 nel primo caso, e minore di λ_2 nel secondo caso.

L'errore nella determinazione di λ_0 , λ_1 e λ_2 è risultato inferiore ad 1,5%.

L'autore ringrazia il Ch.mo Prof. Ing. Ercole De Castro per il costante interessamento al presente lavoro.

5. — APPENDICE.

Ci proponiamo di dimostrare ora che l'andamento della funzione $\psi(\lambda)$ deve essere del tipo indicato in fig. 3. In essa la curva 1 rappresenta il possibile andamento nella ipotesi di $\psi'(\lambda) < 0$, in corrispondenza ad un generico autovalore λ_k , la curva 2 l'andamento per $\psi'(\lambda_k) > 0$.

Poichè in virtù del teorema di esistenza degli autovalori la $\psi(\lambda)$ può annullarsi solo per $\lambda = \lambda_k$ ($k = 0$,

1, ...), resta da dimostrare che la $\psi(\lambda)$ è una funzione continua di λ , mentre la $\psi'(\lambda)$ è continua e diversa da zero per ogni $\lambda = \lambda_k$.

Ricordando le espressioni della $\psi(\lambda)$ e della $\psi'(\lambda)$, che qui di seguito riportiamo:

$$(24) \quad \psi(\lambda) = h_2 y(\lambda, T) + h_2 y'(\lambda, T)$$

$$(25) \quad \psi'(\lambda) = h_2 \left[\frac{d}{d\lambda} y(\lambda, T) \right] + h_2 \left[\frac{d}{d\lambda} y'(\lambda, T) \right]$$

si deduce che la $\psi(\lambda)$ e la $\psi'(\lambda)$ sono funzioni continue di λ poichè $y(\lambda, t)$ e la sua derivata rispetto al tempo $y'(\lambda, t)$, sono funzioni continue e derivabili più volte del parametro λ , nell'ipotesi, invero poco restrittiva che la $f(\lambda, t)$ (vedi equazione 1) sia continua e dotata di derivate parziali continue rispetto a λ e t [6].

Si vede inoltre che, essendo nulla la (24) per $\lambda = \lambda_k$, l'annullamento della $\psi'(\lambda_k)$ è possibile solo se è nullo il determinante

$$\begin{vmatrix} y(\lambda_k, T) & y'(\lambda_k, T) \\ \left[\frac{d}{d\lambda} y(\lambda, T) \right]_{\lambda=\lambda_k} & \left[\frac{d}{d\lambda} y'(\lambda, T) \right]_{\lambda=\lambda_k} \end{vmatrix}.$$

Tale condizione, almeno in generale, non risulterà soddisfatta.

Manoscritto pervenuto il 30 gennaio 1961.

BIBLIOGRAFIA

- [1] FRANCESCO TRICOMI: *Equazioni differenziali*. - Ed. Einaudi
- [2] ERCOLE DE CASTRO: *Sulla stabilità delle oscillazioni di rilassamento sincronizzate mediante impulsi*, «Alta Frequenza», Aprile 1960.
- [3] KORN AND KORN: *Electronic Analog Computers*. - Mc. Graw Hill Book Company.
- [4] ALBERT S. JACKSON: *Analog Computation*. - Mc. Graw-Hill Book Company Inc.
- [5] LOUIS B. WEDEL: *Automatic Iteration on an Electronic Analog Computer*. - Western Electronics Show and Convention, Los Angeles, August 1954.
- [6] GIOVANNI SANSONE: *Equazioni differenziali nel campo reale*. - Ed. Zanichelli.

Procedimenti e sistemi di raffreddamento di tipo termodinamico per macchine elettriche statiche e rotanti

Ritengo di particolare interesse ed attualità il lavoro del dr. ing. Giuseppe Sogni, già mio valente ed apprezzato collaboratore presso l'Ansaldo San Giorgio di Genova, negli anni in cui rivestii, presso tale Azienda elettromeccanica, la carica di Direttore degli Uffici Progetti.

Egli mi espresse le sue idee intorno alla possibilità ed utilità di raffreddare « termodinamicamente » il macchinario elettrico in genere, verso l'anno 1957, quando già, da diverso tempo, la tendenza a impiegare e a realizzare costruzioni di potenza sempre più elevata andava affermandosi, diventando oggi, per note ragioni, particolarmente sentita e sostenuta non solo dall'esercizio, ma anche dalla fabbricazione.

Infatti, mentre sono pronti o in via di completamento, negli USA, turbogeneratori da 320 MVA, già si parla di potenze senz'altro possibili di 500 MVA; e sembra inoltre, che almeno i turbinisti, siano preparati ad affrontare la costruzione di unità da 700-800 MVA.

E poi assai importante il fatto che l'esercente gradisce ormai le costruzioni che, a pari prestazione, occupino uno spazio sempre minore; ovvero che, a pari spazio e diciamo pure peso, diano prestazioni maggiori.

Si può considerare tramontato il tempo in cui una macchina elettrica veniva principalmente valutata per il suo peso; e sempre più salutato è lo sforzo dei costruttori che continuamente s'industriano di diminuire il fabbisogno di materiali metallici ed isolanti per unità di potenza. Ciò anche se ne risulta un costo specifico, come talvolta avviene, maggiore.

Ne derivano enormi facilitazioni agli effetti dei mezzi di costruzione, di trasporto e di montaggio.

In fondo, ciò che è utile è il servizio che si può ricavare dal materiale, e non il materiale stesso.

Come è noto, la strada che si è seguita per ridurre continuamente l'impegno di materiali per unità di potenza, è stata quella del costante miglioramento delle qualità magnetiche, isolanti e meccaniche di tali materiali, nonché l'introduzione di mezzi e sistemi sempre più efficienti di raffreddamento.

Tuttavia nulla si è potuto, almeno in larga misura, fare nel senso di elevare considerevolmente la temperatura di lavoro del macchinario elettrico per incrementare il naturale e diretto deflusso del calore verso l'ambiente ordinario (aria a 40°C od acqua a 25°C).

Ciò per causa della bassa resistenza, alle alte temperature, dei materiali isolanti di grande e comune impiego.

E chiaro che se si fosse potuto disporre, nel senso più ampio, rispetto alle caratteristiche richieste o desiderate dall'impiego, di materiali isolanti, solidi e fluidi, molto più resistenti degli attuali alle alte temperature e a prezzi convenienti, un buon cammino si sarebbe potuto compiere, per tale via, allo scopo di ridurre ulteriormente il dimensionamento del macchinario elettrico. Forse non è escluso che un giorno una possibilità del genere si presenti, nella ricerca, che tutt'oggi anima gli sperimentatori, verso la realizzazione, sotto un complesso di aspetti, di materiali isolanti migliori degli attuali, il cui costo, però, sarà probabilmente maggiore.

Data la situazione di fatto che è ancora e vieppiù va-

lida, il dr. ing. Sogni mi espresse, nel 1957, l'idea di operare intanto in un'altra direzione per conseguire lo scopo; e cioè di raffreddare al disotto dell'ambiente esterno l'ambiente proprio di funzionamento del macchinario, per far sì che, fondamentalmente, il guadagno che si consegue per l'abbassamento di temperatura di quest'ambiente al disotto di quello esterno (aria od acqua), vada a beneficio dell'aumento di temperatura fra ambiente interno e conduttori, e fra ambiente interno e ferro, conseguendosi così la possibilità d'incrementare le normali densità di corrente nei conduttori stessi e, in una certa misura, l'induzione nei materiali magnetici; e col risultato di aumentare considerevolmente la potenza del macchinario, a pari quantità e qualità di materiali, restando invariate, o anche diminuite, le temperature di lavoro degli avvolgimenti e del ferro.

Il criterio può, naturalmente, essere applicato anche a macchine elettriche in servizio.

Il raffreddamento così concepito è quello che il dr. ing. Sogni, a differenza dell'altro classico ambientale, ha chiamato « termodinamico », perchè non può avvenire automaticamente per via diretta, non potendo il calore, per via diretta, essere trasferito da un livello di temperatura inferiore ad un livello di temperatura superiore.

Tale raffreddamento è facilmente realizzabile con i mezzi e i sistemi che l'industria specializzata ha saputo affrontare e introdurre a favore di quella del « freddo » e per risolvere problemi di condizionamento ambientale in senso lato.

In altri termini, l'idea del dr. ing. Sogni, in seguito alla quale egli ha depositato un brevetto, è quella di applicare al raffreddamento del macchinario elettrico che per l'entità della sua potenza lo giustifichi, il concetto del comune « frigorifero », usando come mezzo intermedio di trasferimento, i vari fluidi frigoriferi di normale impiego per altre applicazioni.

Naturalmente, per ottenere il raffreddamento termodinamico, occorrono, in aggiunta al normale refrigerante (condensatore), un evaporatore e un compressore, richiedente (quest'ultimo) una potenza meccanica di un certo rilievo.

Ma lo svantaggio che ne deriva è solo apparente rispetto ai conseguenti benefici.

E per questo che ho insistito presso il dr. ing. Sogni, perchè volesse rendere noto il suo studio che a me, sin da allora, parve nuovo nel campo del raffreddamento del grande macchinario elettrico.

Sono pertanto lieto che egli abbia accolto il mio amichevole suggerimento a pubblicare quest'articolo che mi auguro riceverà dai lettori de « L'Elettrotecnica » favorevole accoglienza.

All'articolo del dr. ing. Sogni ho pensato fosse di qualche interesse far seguire un mio studio comparativo più particolareggiato sul raffreddamento termodinamico dei trasformatori tendente a stabilire delle pratiche conclusioni a cui si perverrebbe in un confronto tecnico ed economico fra grandi unità a circolazione forzata d'olio raffreddato ad aria per mezzo di aerotermini di tipo convenzionale, ed eventualmente a circolazione forzata d'olio in raffreddamento termodinamico, essendo sempre, in definitiva, nei due casi, l'ambiente esterno aria quello nel quale vengono dissipate le perdite.

B. CERRETELLI

NOTIZIE E INFORMAZIONI

L'impianto idroelettrico di Torbole. — L'impianto di Torbole è il più recente costruito a valle del sistema di impianti per lo sfruttamento idroelettrico integrale del bacino del Sarca, sviluppato gradatamente a partire dall'immediato dopo guerra e già in gran parte realizzato, con la successiva

cora, producibilità e potenza, di qualche relativamente modesto incremento con allacciamenti di bacini finitimi a quello del Sarca; la superficie totale del bacino utilizzato, chiuso alle sezioni di presa dell'impianto di Torbole (circa 242 m s.l.m.) è di circa 870 km².

Degli impianti già realizzati quelli della Rocca e di Nembia sono di minor rilievo (20 GWh, 9 MW il primo; 40 GWh e 19 MW il secondo), mentre i due impianti di S. Massenza I e S. Massenza II che hanno in comune la centrale, concentrano circa metà della producibilità complessiva dell'intero sistema ed i due terzi della potenza efficiente.

La portata massima erogata da S. Massenza I è di 70 m³/s, quella erogata da S. Massenza II è di 16 m³/s. Sono dunque in totale 86 m³/s che attraverso al canale di restituzione confluiscono nei laghi tra loro comunicanti di S. Massenza e Toblino.

Il torrente Rimone emissario dei due laghi è stato ora ampliato per consentirgli di smaltire il deflusso totale di S. Massenza.

Il Rimone sbocca nel lago di Cavedine e le sue acque possono o defluire negli esistenti impianti di Fies e Dro, oppure essere restituite al fiume Sarca attraverso ad un altro canale, detto Rimone di Dro.

Al lago di Cavedine confluiscono, oltre alla restituzione della centrale di S. Massenza, le acque del bacino diretto e le acque del bacino residuo del Sarca, derivate con due opere di presa in località Le Sarche e Pietramurata.

Il nuovo impianto di Torbole, sottende i due preesistenti impianti.

Il lago di Cavedine è utilizzato come serbatoio di regolazione giornaliera e settimanale del nuovo impianto di Torbole con la capacità di 6 milioni di m³ circa, ed una oscillazione max di livello di 8 m, ottenuta tutta con svaso del lago naturale, senza opere di ritenuta.

L'opera di presa è stata ricavata sulla sponda orientale del lago.

Dalle opere di presa parte una galleria di derivazione in pressione di sezione policentrica subcircolare di 28,90 m² con diametro fondamentale di 5,90 m, lunga 14 km.

La galleria ha una portata max di 100 m³/s e termina nel sistema di pozzi piezometrici, largamente dimensionato per consentire le più gravose manovre di carico.

Il sistema dei pozzi è costituito oltre che dal pozzo metallico all'inizio della condotta forzata, da un secondo pozzo del diametro di 8 m interrato nella montagna, da una camera inferiore di rifornimento del diametro di 6,50 m ad elica e da una camera superiore di espansione di sezione trapezia della capacità di 12 000 m³, ricavate queste entrambe nella roccia.

Dai pozzi piezometrici ha inizio la condotta forzata me-

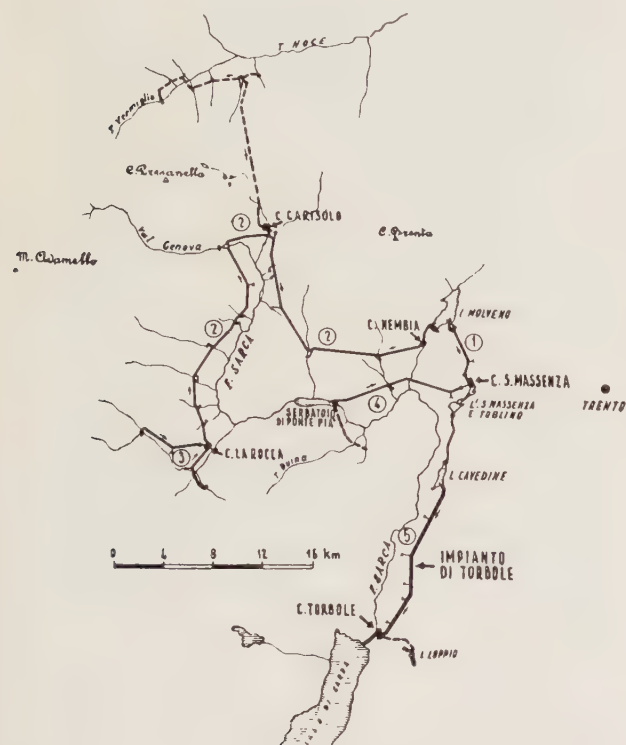


Fig. 1. — Corografia generale.

1, galleria in derivazione di pressione dal Lago di Molveno; 2, canale di derivazione Sarca-Molveno; 3, derivazione Torrente Arnò; 4, derivazione medio Sarca; 5, galleria di derivazione in pressione dal Lago Cavedine.

entrata in servizio delle centrali di Santa Massenza, Nembia e La Rocca.

Con l'avvio della centrale di Torbole, l'utilizzazione del bacino risulterà completa tra la quota 900 m s.l.m. circa e

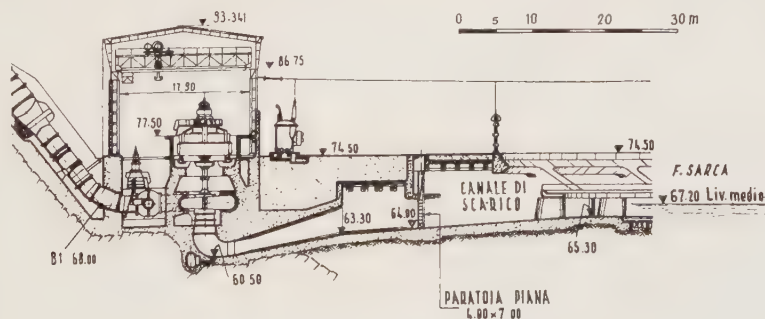


Fig. 2. — La centrale di Torbole. Sezione trasversale.

la quota finale di restituzione al lago di Garda (65 m s.l.m.), mentre sono in avanzata fase di progettazione gli impianti superiori che sfrutteranno le acque a partire dalla quota 2 200 fino alla quota 900.

La producibilità totale del sistema sarà dell'ordine di 1 500 GWh, con una potenza efficiente di 650 MW, suscettibili an-

tallica della lunghezza complessiva di 257 m e del diametro di 4,40 m nel tratto in galleria e di 4 m nel tratto esterno.

Nella centrale all'aperto, sulla sponda sinistra del fiume trovano posto due gruppi turbina-alternatore. È previsto il posto per un terzo gruppo da installare in un prossimo futuro.

I gruppi ad asse verticale da 300 giri/min sono composti da una turbina Francis per 170 m di salto lordo medio e da un alternatore da 66 MVA. La portata erogata da ciascuna turbina è di 40 m³/s.

Nella centrale sono inoltre installati due gruppi da 400 kVA a 380 V per i servizi ausiliari. Tre trasformatori da 65 MVA cadauno di cui uno destinato al futuro terzo gruppo generatore, 12,8/220 kV, sono sistemati all'esterno a ridosso della centrale, mentre la stazione di smistamento è situata sulla sponda opposta del fiume e da essa si dipartono in direzione opposta le linee di collegamento sia verso la rete SIP sia verso la rete Edison.

(Rassegna SIP 1961, n. 1).

* *

La **linea sperimentale a 460-750 kV** della General Electric Co. (Progetto EHV) è in avanzata costruzione presso Pittsfield (Mass.). L'impianto comprenderà 2 sezioni lunghe circa 7 km.

Una linea a 750 kV potrà trasmettere una potenza 36 vol-



Fig. 1. — I conduttori dell'impianto EHV con effetto corona. I conduttori sono alimentati a 460 kV e mostrano l'effetto corona perché sono isolati; l'effetto scomparirà quando i conduttori saranno raggruppati a fasci di 4, come si vede nell'angolo superiore destro della fotografia.

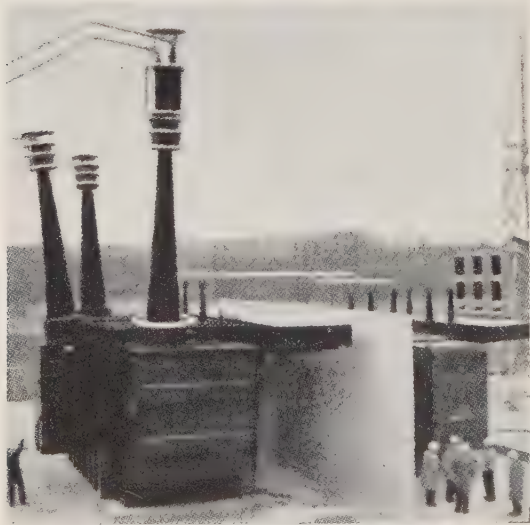


Fig. 2. — Trasformatore per l'impianto EHV.

Il trasformatore eleva la tensione a 450 kV. Un trasformatore di regolazione (a destra della parete) regola la tensione in arrivo di 115 kV a $\pm 30\%$ per permettere di realizzare le varie tensioni di prova. Il passante si eleva 6 m sopra il cassone e penetra 3 m nell'interno.

te più grande di una linea a 115 kV e permetterà economia nelle spese di costruzione, di espropri, delle palificazioni, dei conduttori e delle apparecchiature.

Sull'impianto saranno eseguite prove e misure riguardanti disturbi alle teletrasmissioni; sovratensioni e sovracorrenti; tensione meccanica assiale; massimo angolo di oscillazione e frequenza delle oscillazioni prodotte dal vento e dalle variazioni di temperatura; fulminazioni; perdite corona.

Sui pali sarà montata un'asta lunga 12 m per richiamare i fulmini. Un generatore di impulsi permetterà di applicare alle linee impulsi di 3 000 kV.

Gli strumenti di misura forniranno in modo continuo le segnalazioni a un elaboratore elettronico di dati, con ritmo di 20 minuti durante il tempo buono e di 2 minuti durante i temporali, per un complesso di circa 10 milioni di dati in un anno.

Saranno sperimentati conduttori di lega d'alluminio, con spaziature di 6-9-11,20 m per la tensione di 450 kV, e di 13,50-15 m per la tensione di 750 kV.

(Electrical Engineering, febbraio 1961).

* *

Prosegue nel 1961 l'Anno Geofisico Internazionale. — Per alcuni tipi di indagini, come le misurazioni delle variazioni del campo magnetico terrestre, non è prevista alcuna nuova iniziativa, dato che si tratta di esperimenti che già vengono condotti con criteri uniformi negli osservatori di tutto il mondo e per l'intero anno. In diversi altri esperimenti, come ad esempio quelli con i raggi ionosferici ed esosferici, è prevista una certa coordinazione dei programmi nazionali e il loro sincronismo.

Tre giorni al mese sono stati denominati « RWD » (dalle iniziali di « Regular World Days », ossia giorni regolari mondiali). Essi capitano in genere verso la metà di ogni mese e, nei limiti del possibile, in corrispondenza dei solstizi e degli equinozi. In corrispondenza di questi giorni vengono consigliati ai paesi partecipanti alle attività del Calendario, studi di geofisica atmosferica, comprendenti gli aspetti dei raggi cosmici, della meteorologia, del bagliore notturno e del geomagnetismo.

Ogni trimestre (marzo, giugno, settembre e dicembre) dieci giorni consecutivi, comprendenti anche i tre RWD del mese, sono designati « RWI » (« Regular World Intervals », ossia intervalli regolari mondiali). Questi giorni sono destinati ad esperimenti che, per ragioni pratiche, non possono essere svolti ininterrottamente, ma sui quali occorrono dati statistici con le variazioni stagionali. Tra queste indagini, vanno annoverati i rilievi sulle variazioni della ionosfera e le misurazioni dei venti ad altissima quota.

A gennaio, aprile, luglio, ottobre 1961 e gennaio 1962, dieci giorni consecutivi, denominati « WMI » (« World Meteorological Intervals » o intervalli meteorologici mondiali), in corrispondenza delle sensibili variazioni stagionali in alcuni fenomeni meteorologici, saranno dedicati a speciali programmi di osservazioni con l'ausilio dei razzi e di altri mezzi per sondaggi atmosferici.

Infine, due « Settimane Internazionali dei Razzi » (IRW), dal 12 al 18 febbraio e dal 16 al 22 luglio, forniranno l'opportunità per coordinare i lanci di razzi in occasione del verificarsi di particolari fenomeni.

* *

Prossima l'entrata in funzione del primo generatore termoelettrico. — La Northern Illinois Gas Company ha affidato alla Westinghouse Electric Company la costruzione del primo generatore termoelettrico commerciale da 100 W per la trasformazione diretta del calore in elettricità.

Il generatore sarà installato ad Aurora (Illinois) per prevenire l'autocorrosione delle condutture del gas. L'energia elettrica prodotta dal generatore neutralizzerà l'elettricità statica che si sviluppa al passaggio dei gas nelle tubazioni, eliminando così la causa della corrosione.

L'apparecchio pesa 34 kg ed è alto 60 cm. I gas caldi prodotti dalla combustione di propano alla base del generatore passano attraverso un cammino isolato entro il quale sono disposte coppie termoelettriche che provvedono alla produzione dell'elettricità.

Il dr. S. R. Milliken, capo della Sezione ricerche dell'azienda per la distribuzione del gas e dell'elettricità dell'Illi-

nois settentrionale, ha dichiarato che il generatore verrà installato in una stazione di pompaggio inaccessibile e priva di qualsiasi linea elettrica. Il generatore provvederà anche all'erogazione della corrente elettrica necessaria per il funzionamento di contatori, dispositivi per regolare il flusso del gas nelle tubazioni e apparecchi di comunicazione a microonde.

* *

L'elicottero nel montaggio delle linee aeree. — Per la costruzione di una linea aerea americana venne utilizzato un



Fig. 1. — Trasporto di un portale in legno e posa diretta nei fori predisposti nel terreno.

elicottero Sikorsky per trasportare in posto i pali già costruiti. In una sola mattinata vennero trasportati i pali necessari per una tratta di oltre 7 km e precisamente 17 pali per un peso complessivo di circa 125 t, con 4 ore e mezzo di volo. Coi metodi ordinari sarebbero occorse 3 settimane.

L'elicottero si dimostrò anche molto utile per la erezione dei pali, dopo averli trasportati in posto: in 14 minuti poterono essere messi in opera due pali alti 20 m, che avrebbero richiesto 30 ore-operaio.

Nello stendimento dei conduttori, l'elicottero in 4 ore e mezzo, permise il distendimento di circa 40 km di cavo.

In altre prove venne trasportato un palo a traliccio inte-



Fig. 2. — Trasporto di un traliccio in ferro per 1₁nea a 135 kV.

ramente costruito, pesante 1 400 kg per una linea a 138 kV (fig. 2); l'intera operazione richiese 10 minuti. (*Electrical World*).

* *

L'impianto Stura di Demonte 1° salto della Società CIE-LI. — Nello scorso mese di settembre è stato posto in servizio, in provincia di Cuneo, l'impianto Stura di Demonte 1° salto della Compagnia Imprese Elettriche Liguri (CIELI).

L'impianto ora costruito si sviluppa immediatamente a monte del precedente tra l'abitato di Bersezio, ove è posta l'opera di presa principale, e la località di Pietraporzio ove è ubicata la centrale. Il sistema idroelettrico costituito da due impianti si sviluppa tra quota 1 606 circa e quota 817: la centrale del primo salto, con una potenza installata di 13 550 kW, utilizza su un salto utile lordo di circa 370 m i deflussi di un bacino imbrifero di 86,51 km², mentre la centrale del secondo salto, avente una potenza installata di

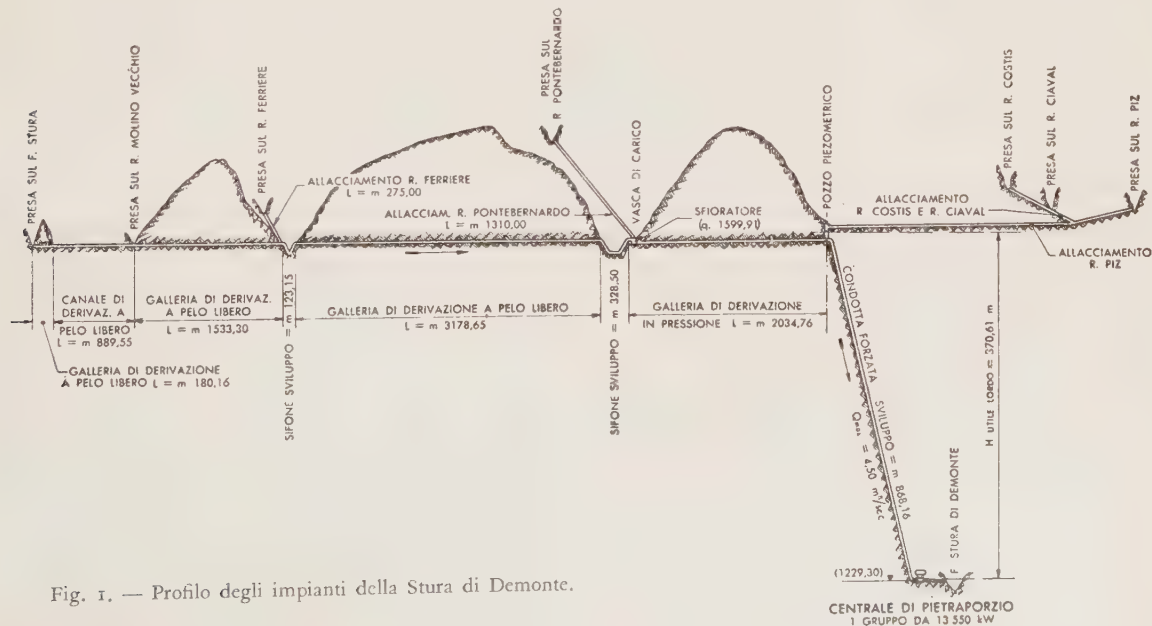


Fig. 1. — Profilo degli impianti della Stura di Demonte.

59 310 kW, utilizza su un dislivello di 385,50 m i deflussi di un bacino di 293,1 km².

L'energia mediamente producibile dal complesso dei due impianti ammonta a 290 milioni di kWh annui, di cui 75 milioni di kWh invernali.

Come già si è accennato, l'impianto Stura di Demonte 1° salto utilizza, su un salto utile lordo di 370,61 m, i deflussi di un bacino imbrifero di 86,51 km², dei quali 38,91 km² sottesi dalla presa principale sul fiume Stura ed i rimanenti afferenti alle prese sussidiarie poste su alcuni suoi affluenti di destra (fig. 1).

L'opera di presa principale sul fiume Stura, a quota 1 605,75 m s.l.m., consiste in una traversa fissa in calcestruzzo, con condotto di presa incorporato, e nel relativo dissabbiatore situato in caverna.

Dall'opera di presa si inizia il canale di derivazione a pelo libero dello sviluppo complessivo di 6 245 m.

Il pozzo piezometrico è costituito da una canna cilindrica con strozzatura inferiore; la canna cilindrica è rivestita in calcestruzzo, ha un diametro interno di 4,50 m, un'altezza di 15,50 m ed un volume utile di 225 m³; l'escursione tra il massimo ed il minimo livello dinamico è di 12,34 m.

Al pozzo piezometrico segue la condotta forzata avente uno sviluppo totale, dall'inizio alla valvola rotativa di macchina, di 868 m.

La centrale dell'impianto Stura di Demonte 1° salto (figura 2) è del tipo all'aperto.

Nella centrale è installato un gruppo generatore ad asse verticale della potenza di 13 550 kW, costituito da una turbina Pelton a 4 getti accoppiata ad un alternatore trifase da 15 000 kVA. La producibilità media annua dell'impianto è di 64,2 milioni di kWh.

L'eccitazione è ottenuta a mezzo di una eccitatrice princi-

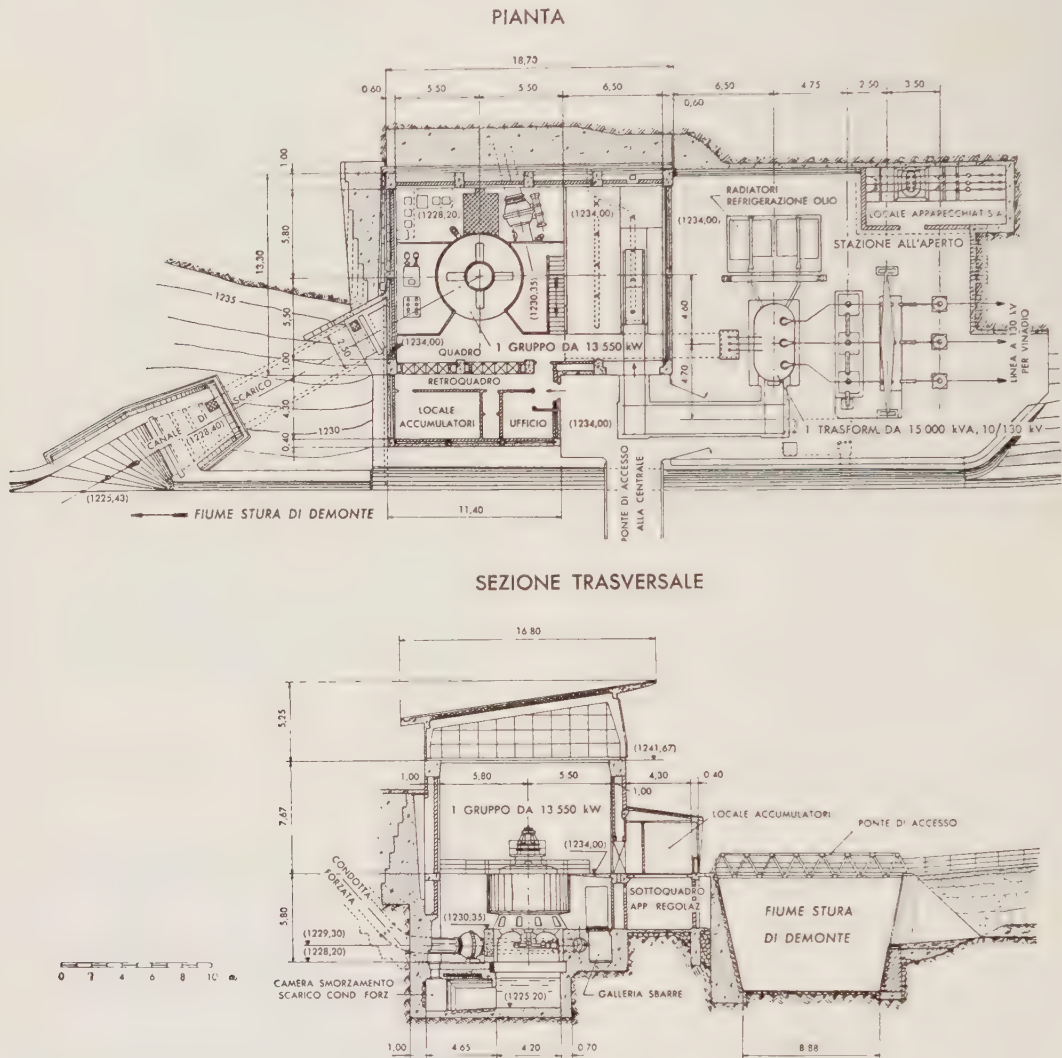


Fig. 2. — Pianta e sezione della centrale dell'impianto 1° salto.

Per l'attraversamento dei rii Ferriere e Pontebernardo sono stati costruiti due sifoni in tubazione metallica del diametro interno di 1,56 m e dello spessore di 5 mm, aventi rispettivamente uno sviluppo di 132 e di 332 m.

Il sifone per l'attraversamento del rio Pontebernardo si trova al termine del secondo tronco in galleria del canale di derivazione a pelo libero; subito a valle di detta opera è stata ricavata in caverna una vasca di carico, del volume di 180 m³, munita di sfioratore laterale dello sviluppo di 20 m e di condotto di scarico con relativo smorzatore.

Dalla vasca di carico ha inizio la galleria di derivazione in pressione. La galleria è a sezione circolare con diametro interno di 1,82 m, ha una lunghezza di 2 050 m e si sviluppa, come la precedente.

Per l'allacciamento di alcuni affluenti di destra dello Stura sono state costruite sei prese sussidiarie.

pale e di una eccitatrice ausiliaria coassiali al rotore dell'alternatore; coassialmente è pure montato un alternatore a magneti permanenti per l'alimentazione del motore del pendolo del regolatore della turbina.

Lateralmente all'edificio della centrale è posta la stazione di trasformazione all'aperto, ove sono installati il trasformatore elevatore e le apparecchiature relative alla linea a 130 kV in partenza.

La centrale di Pietraporzio è realizzata per un funzionamento totalmente automatico; solamente in previsione di talune particolari condizioni di esercizio, la regolazione del carico attivo e reattivo può essere telecomandata dalla centrale di Vinadio a mezzo di un'apparecchiatura ad onde convogliate, transistorizzata, costruita dalla CEA-Perego.

(Quaderni Edison del 16-12-1960).

* *

Un motore Diesel da 19 000 kW è stato recentemente collaudato nello Stabilimento FIAT Grandi Motori, a Torino. Del nuovo motore denominato 900 S abbiamo dato una prima notizia (vedi «L'Elettrot.», 1959, pag. 774) in occasione del Convegno promosso dalla FIAT nel cinquantenario dell'inizio della produzione dei motori Diesel.

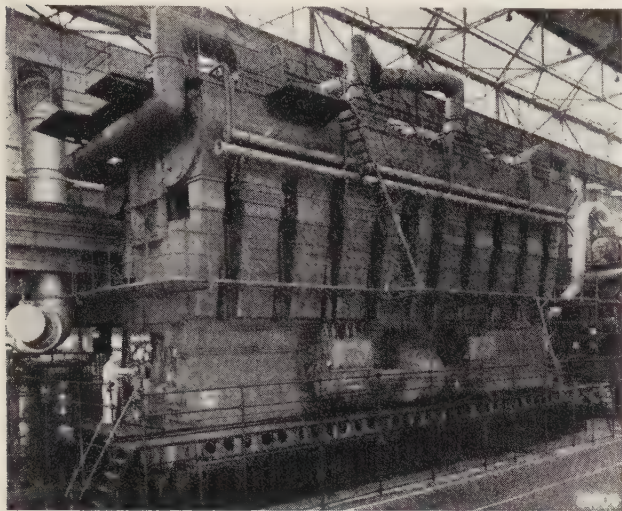


Fig. 1.

La prima unità ora collaudata è a 9 cilindri, da 900 mm di diametro con corsa di 1 600 mm, a due tempi, a semplice effetto, sovralimentato. Si tratta probabilmente del motore Diesel più potente che sia finora stato mai costruito. La potenza massima, sviluppata a 131,4 giri/min, è infatti di oltre 19 000 kW, corrispondente a 2 140 kW per cilindro. Il consumo di nafta è risultato di 225 g/kWh alla potenza massima e di 210 g/kWh alla potenza normale di 14 000 kW.

Il motore è destinato ad essere installato su una petroliera da 38 000 t.

Altre 11 unità a 8-9-12 cilindri sono in costruzione.

* *

Il VI Convegno - Mostra dell'Automazione e Strumentazione si svolgerà a Milano dal 7 al 12 novembre 1961, organizzato dalla Federazione delle Società Scientifiche e Tecniche di Milano.

I temi del Convegno riguardano le Teorie dell'Automazione e le applicazioni dell'automazione e della strumentazione nella metallurgia, nella elettrotecnica, nella fisica nucleare, nella meccanica, nella chimica, nella termotecnica e negli uffici. Le Memorie devono pervenire alla Federazione (Via S. Tomaso 3, fino al 30 aprile e successivamente, Via del Politecnico 10) entro il 15 agosto 1961.

* *

Una Conferenza internazionale sul riscaldamento, la ventilazione e il condizionamento dell'aria sarà tenuta a Londra dal 27 settembre al 4 ottobre 1961, su iniziativa della Institution of Heating and Ventilating Engineers.

La Conferenza ha lo scopo di esaminare i futuri sviluppi della tecnica del riscaldamento e del condizionamento dell'aria e di discutere le tendenze prevedibili per i prossimi 10 anni. Il programma comprende sedute di studio e visite tecniche, oltre a numerose manifestazioni accessorie. Vi sarà pure una esposizione di apparecchi e impianti, con la partecipazione di espositori europei ed americani.

La quota di iscrizione è fissata in 12 sterline. Per informazioni rivolgersi a: Conference Secretariat - Institution of Heating and Ventilating Engineers (49 Cadogan Square - London SW1).

* *

Una Conferenza delle Nazioni Unite su le nuove sorgenti di energia si svolgerà a Roma dal 21 al 31 agosto 1961. La Conferenza è stata preceduta da riunioni di specialisti tenutesi nello scorso anno a Madrid, a Grenoble e a Roma, nelle quali è stato stabilito l'O.d.G.

La Conferenza ha lo scopo di riunire gli specialisti della utilizzazione delle sorgenti di energia solare, eolica e geotermica, con i tecnici della produzione di energia in generale, per fornire a questi notizie sui più recenti progressi e facilitare un largo scambio di idee intorno allo sfruttamento di queste sorgenti di energia specialmente nelle regioni dove manchino le fonti classiche.

Alla Conferenza parteciperanno soltanto i tecnici che saranno personalmente invitati da parte del Segretariato della Conferenza, che ha sede presso le Nazioni Unite, a New York.

LIBRI E PUBBLICAZIONI

Kunststoffe in der Hochspannungstechnik. (Editore VDE Verlag, Berlino, 1959. Volume di 88 pagine, 21 x 29 cm, con molte figure, senza indicazione di prezzo).

Il fascicolo riunisce i contributi — già pubblicati sulla rivista ETZ — presentati alla riunione annuale della Società di studi per gli impianti ad altissima tensione, tenutasi a Innsbruck nel 1959, sull'impiego delle materie plastiche come isolanti per alta tensione.

La prima relazione pone in rilievo i legami esistenti fra la struttura molecolare delle varie materie plastiche e le loro proprietà elettriche, il che è particolarmente importante ai fini di una loro classificazione.

Due relazioni si occupano delle caratteristiche di questi materiali che possono essere misurate e della modalità e significato di tali misure.

Le proprietà fisiche fondamentali sono messe in luce dalle misure con sollecitazioni meccaniche alternate — modulo di elasticità e smorzamento — o con sollecitazioni elettriche alternate — costante dielettrica e angolo di perdita. Queste misure permettono anche di prevedere la durata degli isolanti in relazione alle varie sollecitazioni elettriche, meccaniche, termiche e chimiche a cui possono essere sottoposti. Le misure di rigidità elettrica, di resistenza alle correnti di fuga o all'effetto corona servono invece soprattutto ad individuare i punti deboli dell'isolante.

Le relazioni successive si occupano delle applicazioni delle

materie plastiche a specifici problemi di isolamento: isolatori, apparecchiature di manovra, riduttori di misura, cavi, quadri blindati a bassa, media ed alta tensione.

In particolare vengono descritti i progressi realizzati nell'isolamento degli avvolgimenti statici delle macchine elettriche, mediante l'uso di resine termoindurenti, come supporto dell'isolamento in mica o, in assenza di questo, con gomme di silicone o vetro e resine epossidiche.

Le proprietà delle gomme e delle lacche al silicone sono di particolare vantaggio nella costruzione di trasformatori in aria, di tipo incombustibile. La resistenza alle alte temperature permette un maggior sfruttamento dei materiali e riduzioni notevoli di ingombro e di peso senza sensibile aggravio di costi.

Il fascicolo, che è corredato di numerose fotografie e diagrammi, riprodotto con l'abituale nitidezza della rivista da cui sono tratti, riporta anche le discussioni svoltesi sulle relazioni presentate.

*

D. A. BELL: *Electrical noise.* (D. Van Nostrand Company Ltd., London, 1960. Un volume di 15,5 x 23,5 cm, X+342 pagine, 98 figure. Prezzo 50 s).

Il volume segna il principio dell'estensione del campo di

attività della nota Casa Editrice alle fonti inglesi; la scelta non poteva essere migliore per marcare la serietà dei propositi.

È un trattato completo ed esauriente che contiene l'esposizione dei concetti fondamentali e delle conoscenze, anche particolari, necessarie ai fisici e agli ingegneri nel campo della teoria del rumore elettrico e delle sue principali applicazioni. Precisi riferimenti storici e una accurata e selezionata bibliografia alla fine di ogni capitolo rendono il libro utilissimo anche a chi da questo desidera prendere le mosse per approfondire lo studio e spingersi verso ulteriori progressi delle conoscenze.

Il primo capitolo contiene la discussione dei concetti fondamentali di fluttuazioni casuali e di corrente elettrica; invece nel secondo sono riassunti ampiamente i concetti matematici necessari alla comprensione del testo: analisi frequenziale, teorema di Campbell, involucri, statistica. Il terzo capitolo è dedicato a un'ampia discussione della relazione tra il teorema di Nyquist e la teoria dell'equipartizione, derivata da studi originali dell'Autore; vengono poi esaminati il meccanismo statistico del rumore Johnson, il rumore elettronico nei diodi con campo acceleratore e in quelli con campo ritardatore, fino a giungere nel capitolo settimo allo studio del diodo con corrente limitata dalla carica spaziale.

Segue l'analisi del rumore nei tubi con griglia di comando e fotomoltiplicatori, e finalmente nel capitolo nono si trovano gli amplificatori a fascio, quelli parametrici e i maser. Il capitolo decimo è dedicato ai semiconduttori con particolare riguardo allo spettro inversamente proporzionale alla frequenza del rumore di corrente, come introduzione generale allo studio del rumore sulle pellicole metalliche nei raddrizzatori, nei transistori e del rumore impulsivo. Il capitolo dodicesimo si riferisce ai rivelatori di radiazioni; nel capitolo tredicesimo, parlando del rumore Barkhausen, sono largamente citati gli studi di Montalenti, Biorci e Pescetti; infine il capitolo quattordicesimo contiene una rassegna delle tecniche di misura e dei generatori campione.

La trattazione è essenzialmente teorica, ma porta alle espressioni che consentono il calcolo effettivo del rumore nei casi pratici; essa è poi anche arricchita dall'esposizione dei più significativi risultati sperimentali.

In complesso è un'opera di grande interesse, che si può definire un trattato completo e aggiornatissimo sull'argomento esposto con chiarezza e mirabile rigore logico e presentata in veste editoriale molto bella.

*

H. LANGE: *Funktechnische Nomogramme*. (Fachbuchverlag, Leipzig, 1959. Un volume di 16,5 x 23 cm, 218 pagine. Prezzo 9,80 DM).

Chi ama fare i calcoli per mezzo di nomogrammi trova in questo volume di che saziare ampiamente il suo desiderio mediante oltre centocinquanta tavole, nelle quali sono tradotte in nomogrammi le formule di uso più corrente.

Ventuno di questi si riferiscono all'elettrotecnica generale e novantasei alla tecnica della bassa e alta frequenza: formule generali, condensatori, induttori, circuiti oscillanti, amplificatori, filtri, trasmissione su linee e in guida d'onda; altri ventuno si riferiscono ai trasformatori di potenza e ripetitori; quindici riguardano i transistori e tredici i tubi elettronici.

L'indice, l'introduzione e le istruzioni sono ripetuti in tedesco, russo e inglese; le diciture sui diagrammi sono in tedesco, ma due fascioletti fuori testo contengono le traduzioni nelle altre due lingue. È anche allegato un righello di materiale trasparente. La grande abbondanza del materiale assicura che si troverà sempre la traduzione in nomogramma delle formule che interessano e i tecnici progettisti saranno certamente grati all'Autore del paziente e faticoso lavoro. I grafici sono disegnati e stampati con molta chiarezza e sono di uso facile e spedito.

*

F. A. FISCHER: *Grundzüge der Elektroakustik*. (Fachverlag Schiele und Schön, Berlin, 1959. Un volume di 21 x 15 cm, 210 pagine, 141 figure, 7 tabelle. Prezzo 24 DM).

Questo volumetto contiene una succosa introduzione ai fondamentali teorici dell'elettroacustica, visti sotto l'angolo visuale dell'elettrotecnica in quanto sono specialmente mes-

se in evidenza le analogie elettromeccaniche e la materia è esposta soprattutto con l'aiuto dei circuiti elettrici equivalenti.

La materia è distribuita in quindici capitoli, nei quali vengono esaminati successivamente i sistemi oscillanti elettrici e meccanici (componenti elementari, analogie, sistemi oscillanti semplici serie e parallelo, circuiti elettrici accoppiati e sistemi meccanici corrispondenti, sistemi continui), le forze meccaniche nei campi elettrici e magnetici (sulla discontinuità, tensioni elettrostrittive e piezoelettriche, tensioni elettromagnetiche e magnetostrittive), i trasduttori elettromeccanici, elettromagnetici ed elettrodinamici, la trattazione sistematica del trasduttore elettroacustico, le equazioni di base e i circuiti equivalenti dei trasduttori, quelli dei sistemi non quasi stazionari, la radiazione, rendimento dei trasduttori come emettitori, impedenza elettrica di ingresso, impedenza meccanica di ingresso, rendimento dei ricevitori, trasduttori a banda larga, trasduttore termico, microfoni a contatto e a condensatore, tecnica delle misure.

L'autorità dell'Autore è garanzia sicura della bontà della trattazione, schematica, succinta, ma chiara e completa, che fornisce le basi fondamentali e la visione fisica dei problemi in buona forma e in buona veste editoriale.

*

F. OLLENDORF: *Elektronik Freier Raumladungen*. (Springer Verlag, Wien, 1957. Un volume di 25 x 16,5 cm, XII+620 pagine, 240 figure. Prezzo 23,35 dollari).

È la seconda parte del secondo volume (Innere Elektronik) dell'opera che si intitola Elettrodinamica tecnica.

Sviluppando la teoria del moto degli elettroni con l'ampiezza e la profondità già riscontrate nei volumi precedenti, l'A. affronta qui lo studio sistematico dei tubi elettronici. Con trattazioni matematiche sviluppate fino alle estreme conseguenze e svolte con larghezza eccezionale di mezzi, egli ricostruisce dai dati geometrici tutte le caratteristiche dei tubi elettronici, fornendo così al progettista gli elementi teorici completi per l'esecuzione del calcolo geometrico.

Sono in tutto sei capitoli e una introduzione, nella quale vengono riassunte le basi fenomenologiche, cioè distribuzioni statistiche ed emissioni termica e secondaria. Vengono poi studiati i campi di carica spaziale libera nei diodi e nei fasci di elettroni, dopo i quali vengono affrontati quelli di carica spaziale comandati elettricamente. Si tratta dapprima dei triodi e poi dei tubi con più griglie nelle diverse forme.

Lo studio delle oscillazioni della carica spaziale porta a quello dei fasci con modulazione di velocità con tutte le relative conseguenze. Vengono poi i casi di comando magnetico e quindi i magnetron dal più semplice al più complesso; e infine i tubi a onde progressive rientrano nella categoria dei sistemi con carica spaziale comandata elettromagneticamente.

Come sempre l'esposizione è chiara e rigorosa. Il testo è essenzialmente un trattato di fisico-matematica, ma i risultati sono sempre esposti nella forma direttamente utilizzabile nelle applicazioni. Esso contiene quindi la base logica necessaria, come si è detto, allo sviluppo di qualsiasi procedimento di progetto.

*

H. LANGE: *Schaltungen der Funkindustrie*. Vol. III. (Fachbuchverlag, Leipzig, 1960. Un volume di 16,5 x 23 cm, 554 pagine. Prezzo 23 DM).

Continuando quanto raccolto nei precedenti volumi, sono anche qui riuniti, divisi secondo la fabbrica, gli schemi dei ricevitori sonori e visivi, fonoriproduttori, apparati di misura, amplificatori e così via costruiti nelle due repubbliche tedesche. In tutto sono più di cinquecento schemi certamente utilissimi a larghe schiere di tecnici e anche alle scuole di istruzione professionale.

*

M. GANDAIS - A. SANNERIS: *Principi di traffico telefonico*. Vol. II e appendice II. (STET, Torino, 1960. Due volumi di 28 x 21 cm, XIII+375 pagine e 117 figure; 125 pagine con 70 grafici e 45 tabelle; s.i.p.).

A quattro anni di distanza dal primo volume viene ora pubblicato il secondo volume, corredato anch'esso da una

appendice separata, nella quale sono raccolti esclusivamente grafici e tabelle. Oltre che il seguito del primo volume si trova quindi anche qui un aggiornamento, in quanto gli AA. hanno tenuto conto delle novità e dei progressi sviluppati nell'intervallo.

Di fronte all'opera ora completa si possono confermare i pregi già segnalati quando si è recensito il primo volume. In più appare ora il panorama completo, che porta fino ai metodi di progetto delle centrali telefoniche, per quanto attiene al numero degli organi e alla distribuzione dei collegamenti.

Nel primo capitolo è esposta la teoria più recente sulla valutazione del traffico di trabocco nell'instradamento deviato, esponendo le principali applicazioni e calcolando una serie di diagrammi utili per l'esecuzione dei computi. Completano poi lo studio dei problemi di congestione, cominciato nel primo volume, i metodi di calcolo relativi ai sistemi con collegamenti interstadio sviluppati nel capitolo secondo e anch'essi corredati di numerosi diagrammi. Il terzo capitolo infine si riferisce al traffico casuale e livellato e alle ripartizioni omogenee, di cui vengono mostrate diverse applicazioni.

I quattro capitoli successivi sono dedicati al problema delle misure e degli errori commessi con i diversi metodi; si parla delle misure di traffico in generale, di quelle del traffico smaltito e della durata di occupazione, di quelle di congestione e infine degli impianti e apparecchi per la misura del traffico e per il controllo del grado di perdita globale. Infine gli ultimi tre capitoli raccolgono il frutto degli studi precedenti contenendo lo schema di progetto di centrali automatiche e due applicazioni complete di calcolo del numero di selettori.

Per ogni capitolo sono indicate scrupolosamente le fonti bibliografiche e sono raccolti in appendice grafici e tabelle per gran parte originali. L'esposizione e la stampa sono chiarissime e tutti gli specialisti del ramo devono essere grati agli AA. per il lavoro intelligente e faticoso compiuto per raccogliere e ordinare una materia tanto affascinante quanto difficile.

*

F. WINCKEL: *Technik der Magnetspeicher*. (Springer Verlag, 1960. Un volume in 8° di XVI+614 pagine, con 325 figure. Prezzo 72 DM).

Prima di aver visto questo grosso volume forse neppure gli specialisti della registrazione magnetica sanno quante cose si possono fare per mezzo di questa tecnica e quante cose si possono dire intorno a questa tecnica; la quale assume sotto qualche aspetto addirittura la dignità di una scienza. A loro giustificazione va però il fatto che per scrivere queste seicento pagine sono stati raccolti quattordici specialisti di altissima classe, oltre al titolare coordinatore.

E quattordici sono infatti le parti, in cui è suddivisa la materia, ognuna di esse essendo svolta da uno dei citati specialisti e corredata da ampia bibliografia.

La prima è dedicata ai fondamenti di magnetismo: definizione delle grandezze caratteristiche e unità, curve di magnetizzazione e campo magnetizzante, correnti indotte, teoria del ferromagnetismo. La seconda parte contiene i principi della registrazione e della riproduzione, con ampie trattazioni teoriche e numerosi dati sperimentali sulla forma dei campi magnetici e sugli effetti dell'isteresi, sui rumori, la banda di frequenza, la stabilizzazione e così via. Nella terza parte viene mostrato come si può applicare il modello di Preisach alla teoria della registrazione; mentre la quarta, corredata da suggestive fotografie, è dedicata ai mezzi con cui si rendono visibili i campi registrati. Vengono poi descritti minutamente gli apparecchi di registrazione e riproduzione da studio, domestici, per dettare, per misura. Molto ampia è la sesta parte dedicata alla recentissima tecnica di registrazione sincrona di suoni e immagini per cinematografia e televisione; sono minutamente descritti soprattutto gli apparati di registrazione diretta. Il particolare aspetto delle registrazioni di programmi televisivi è sviluppato nella parte successiva, in cui sono descritti i diversi procedimenti in uso. Viene poi la registrazione in studio con i problemi relativi alla necessità di disporre di numerosi canali.

Altro capitolo di estremo interesse è quello dell'uso dei registratori magnetici nelle calcolatrici elettroniche (nastri,

tamburi, matrici), seguito da un altro relativo alla elaborazione di dati. Un ampio capitolo è dedicato alla tecnica delle misure sui registratori. Infine viene esposta la teoria dei registratori statici e specialmente dinamici, con ampia documentazione di curve e diagrammi. Curve sperimentali e numerose tabelle completano l'esposizione del penultimo capitolo, di natura essenzialmente tecnologica, riguardante tutte le proprietà dei tipi di materiali magnetici usati. L'ultimo capitolo contiene una completa rassegna delle norme relative all'argomento e il volume è chiuso da una serie di tavole di riduzione della lunghezza di nastri e pellicole con differenti velocità.

Come si vede, sarebbe difficile immaginare un panorama più completo. Esso inoltre è particolarmente equilibrato nella estensione e nella importanza attribuite ai singoli elementi. I tecnici specialisti, i progettisti di apparati e anche gli studiosi delle proprietà dei materiali magnetici e delle loro applicazioni trovano in quest'opera abbondantissimo materiale di informazione e anche aiuto prezioso al loro lavoro.

Ottima, come al solito, la veste editoriale.

*

C. P. MARSDEN - W. J. KEERY - J. K. MOFFITT: *Tabulation of Data on Receiving Tubes*. (National Bureau of Standards Handbook 68, 1° novembre 1959. Un volume di 26 x 20 cm, IV+110 pagine. Prezzo 1 dollaro).

Il manuale, dovuto al Servizio Dati degli apparecchi elettronici del N.B.S., contiene una tabulazione dei tubi elettronici riceventi, cioè dei tubi aventi dissipazione anodica non superiore a 25 watt e massima frequenza di lavoro minore di 1 000 megahertz. I tubi considerati sono quelli prodotti dai fabbricanti degli S.U.A. dopo il 1952, con esclusione dei tipi classificati « per ricambi ». Contiene una prima lista numerica, nella quale i tubi sono ordinati in base ai numeri e alle lettere della loro sigla; per ogni tipo sono indicati i dati di accensione, i massimi di corrente e tensione anodica, la dissipazione anodica, la transconduttanza, il coefficiente di amplificazione e la resistenza anodica per precisati valori di tensione e corrente anodica, la capacità di ingresso e di uscita e le connessioni ai piedini.

In una seconda lista i tubi sono divisi in gruppi in base al numero degli elettrodi e in ogni gruppo sono ordinati per valori crescenti di uno o due parametri caratteristici (la transconduttanza e la corrente anodica, per esempio). Una terza lista raccoglie i tipi equivalenti con l'indicazione anche di tipi vecchi non inclusi nelle prime due liste. Gli schemi delle connessioni sono raccolti tutti insieme alla fine.

Il manuale fornisce al progettista un mezzo prezioso per la scelta del tubo più adatto, presentandogli gli elementi necessari a restringere il campo di ricerca a pochi tipi. Per la scelta definitiva occorrono poi i dati più estesi forniti dai fabbricanti, i quali restano anche responsabili dei dati qui raccolti.

*

W. CONRAD: *Grundsaltungen der Funk- und Fernsehtechnik*. (Fachbuchverlag, Leipzig, 1960. Un volume di 16,5 per 23 cm, 155 pagine, con 333 figure. Prezzo 9,80 DM).

Un manuale essenzialmente pratico, in cui sono raccolti ordinatamente gli schemi dei circuiti elementari costituenti i diversi stadi dei ricevitori radio e televisivi. Ogni schema è accompagnato da una breve descrizione, che ne chiarisce la costituzione e il funzionamento. Tutto è puramente qualitativo e descrittivo, senza alcuna indicazione quantitativa.

Partendo dagli alimentatori, si passa agli amplificatori di alta frequenza, poi a quelli di bassa frequenza; vengono successivamente gli oscillatori, i modulatori, i demodulatori, altri elementi vari dei ricevitori sonori, i ricevitori visivi in tutti i loro numerosi elementi.

Lo scopo è di raccogliere i vari schemi elementari per conoscerli e imparare a leggere gli schemi completi degli apparati. Ed è completamente raggiunto con un lavoro sistematico, utile certamente agli studenti, ai progettisti e ai tecnici.

F. Dübi — **Turbine a gas nella centrale termica di Weinfelden delle Forces Motrices du Nord-Est Suisse.** (Rev. Sulzer, 1960, n. 3, pag. 3 a 17).

Le centrali termiche destinate a funzionare su una rete prevalentemente alimentata da impianti idraulici come servizio di punta o di riserva devono rispondere ai requisiti di poter entrare rapidamente in funzione e di non rappresentare un capitale di impianto troppo oneroso tenuto conto della scarsa utilizzazione.

Gli impianti di turbine a gas rispondono bene a queste esigenze perchè sono semplici come concezione e come esercizio, sono pronti a entrare in servizio in qualunque momento e rappresentano una spesa di impianto relativamente modesta.

Le Forces Motrices du Nord-Est Suisse (NOK) hanno messo in servizio nell'inverno 1959-60 una centrale equipaggiata con 2 gruppi da 10 000 kW con turbine a gas Sulzer.

Un conto sommario della corrispondente situazione economica può essere presentato nel modo seguente, con riferimento a turbina a ciclo aperto semplice, senza raffreddamento dell'aria e con un recuperatore.

Le spese di impianto (macchinario, fondazioni, montaggio, serbatoi, ecc.) si possono valutare complessivamente a circa 500 franchi svizzeri per kW installato.

Gli oneri annui fissi, per kW installato, tenuto conto dell'ammortamento, dell'interesse del 3,5 % al capitale, delle spese per amministrazione, per il personale permanente e per la revisione, si possono valutare da 33 a 62 fr/kW secondo che l'ammortamento è considerato da 25 a 10 anni.

Per il costo del kWh prodotto, si assuma: un combustibile da 9 800 cal/kg, che costi 100 fr per tonnellata; un rendimento 26,5 %; un consumo di combustibile di circa 331 g/kWh. Si possono considerare i seguenti oneri per kWh prodotto: combustibile 3,31 centesimi (svizzeri); lubrificanti 0,002 ct; acqua 0,12 ct; personale 0,05 ct; pezzi di ricambio 0,10 ct. Si arriva a un totale di oneri variabili colla produzione, di circa 3,6 centesimi di franco svizzero per kWh prodotto.

Quando la durata del servizio arriva a qualche migliaio di ore annue, gli oneri fissi non incidono che in misura modesta sul costo del kWh mentre divengono nettamente preponderanti gli oneri variabili e specialmente quello relativo al combustibile; per piccole utilizzazioni avviene il contrario.

È interessante vedere l'influenza della variazione del rendimento sul costo dell'energia prodotta.

Supponendo un ammortamento in 15 anni, con le ipotesi precedenti, si riconosce che un impianto avente rendimento di 32 % (invece di 26,5 %) diventa economicamente interessante quando la maggior spesa di impianto corrispondente a tale aumento è inferiore a:

- 13 % per utilizzazione di 1 000 ore annue;
- 25 % per utilizzazione di 2 000 ore annue;
- 37 % per utilizzazione di 3 000 ore annue;
- 60 % per utilizzazione di 5 000 ore annue.

Una semplificazione del ciclo della turbina a gas, per esempio la soppressione di un recuperatore, conduce a un vantaggio qualora essa rappresenti una economia di capitale superiore a:

- 24 % per utilizzazione di 1 000 ore annue;
- 47 % per utilizzazione di 2 000 ore annue;
- 70 % per utilizzazione di 3 000 ore annue.

L'analisi completa dimostra che, in generale, realizzare un sensibile miglioramento di rendimento a prezzo di complicazioni di impianto, viene a costare troppo caro. Impianti con o senza recuperatore risultano pressoché equivalenti (nei riguardi del costo dell'energia prodotta) quando l'utilizzazione annua è di 1 000 a 1 500 ore.

La fig. 1 riassume le considerazioni svolte.

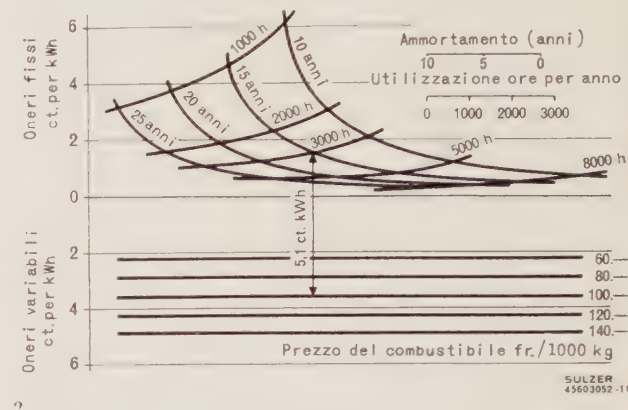


Fig. 1. — Costo dell'energia elettrica - (secondo le ipotesi precisate nel testo).

Nella parte superiore del diagramma: oneri fissi secondo la durata di ammortamento e la utilizzazione annua.

Nella parte inferiore: oneri variabili, secondo il prezzo del combustibile.

DESCRIZIONE DELL'IMPIANTO.

La centrale di Weinfelden contiene, come si è detto, 2 gruppi costituiti da una turbina a gas connessa ad un alternatore trifase da 15 MVA.

Accanto alla centrale si svolge la sottostazione all'aperto, sulla sponda destra del fiume Thur (fig. 2). La sottostazione è collegata alle cabine di Töss e di Winkeln con 2 linee a 150 kV alimentate attraverso 2 trasformatori da 40 MVA (fig. 3); gli stessi trasformatori alimentano anche linee a 50 kV verso Hasli e Solgen.

L'energia fornita dagli alternatori in centrale viene addotta all'avvolgimento terziario dei trasformatori da 40 MVA. I montanti degli alternatori alimentano anche i trasformatori dei servizi interni, la caldaia elettrica e i motori di avviamento delle turbine a gas.

L'impianto di Weinfelden comprende, oltre all'edificio macchine e alla sottostazione all'aperto, l'edificio per il quadro dei Servizi Elettrici di Turgovia a 8/16 kV; l'edificio quadri e servizi, adiacente a quello delle macchine, e il parco serbatoi del combustibile liquido. Poco distante sono l'opera di presa d'acqua sotterranea e gli edifici per le abitazioni del personale.

IL CICLO DELLE TURBINE A GAS.

Dato il servizio cui la centrale è destinata si adottò un tipo di turbina semplice, a un solo asse, funzionante secondo un ciclo aperto (fig. 4).

L'aria per la combustione viene aspirata dall'esterno dal compressore assiale 1) che la porta a circa 4,5 atmosfere assolute e la spinge nel recuperatore 2). Questo è in realtà costituito da 4 apparecchi in parallelo; in esso l'aria viene riscaldata dai gas di scappamento e passa poi alla camera di combustione 3) dove la sua temperatura viene portata, in servizio normale, a 625÷650 °C. I gas

caldi contengono ancora oltre 80 % di aria; essi percorrono la turbina 4) ed escono a pressione atmosferica.

Circa due terzi dell'energia ceduta dai gas alla turbina è assorbita dal compressore mentre il rimanente si trasforma in energia elettrica nell'alternatore 5).

La turbina può fornire potenza soltanto dopo avere raggiunto una velocità pari almeno al 40 % del normale. All'avviamento occorre perciò accelerarla mediante un motore di avviamento con gioco di ingranaggi, il quale viene poi staccato a velocità raggiunta. Lo stesso motore

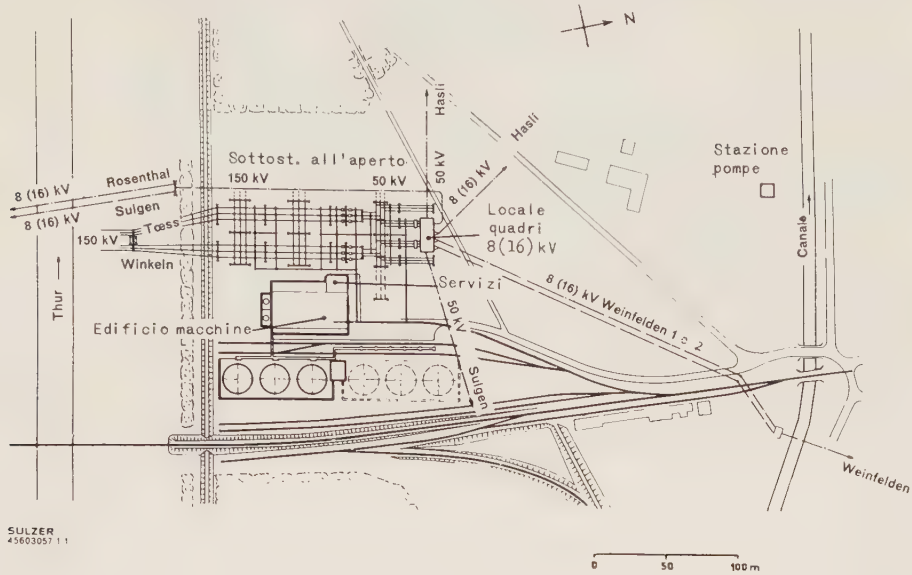


Fig. 2. — Planimetria generale dell'impianto di Weinfelden.

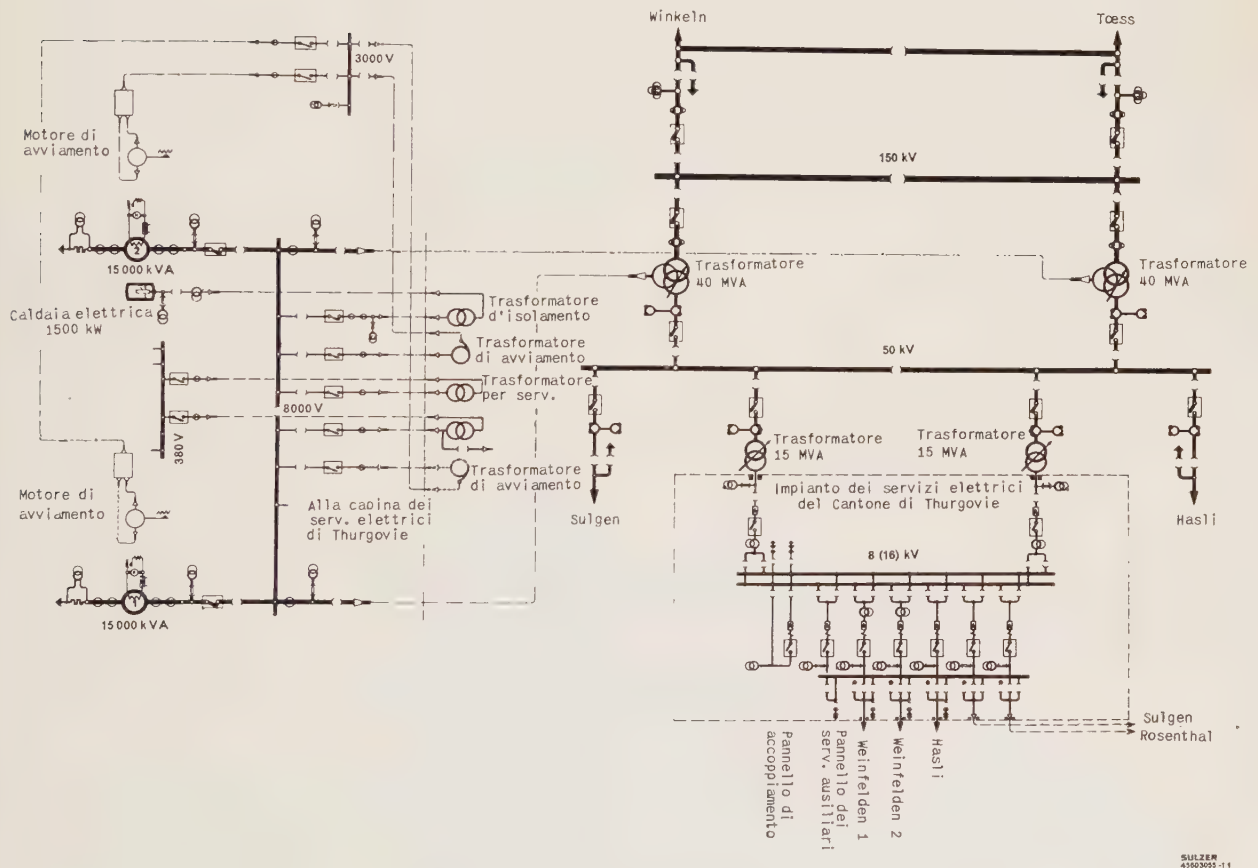


Fig. 3. — Schema elettrico generale.

All'uscita della turbina i gas hanno una temperatura di circa 360 °C e vengono raffreddati nel recuperatore fino a circa 230 °C dopo di che vengono scaricati nell'atmosfera.

può servire per avviare l'alternatore, staccato dalla turbina, per utilizzarlo come compensatore sincrono. La turbina e l'alternatore possono essere staccati o connessi in piena marcia cosicché si può passare, senza arresto, dal

funzionamento come alternatore a quello come compressore e viceversa.

Le turbine hanno il rendimento massimo alla potenza di 10 000 kW. Per i carichi ridotti si diminuisce la quantità di combustibile fornita alla camera di combustione;

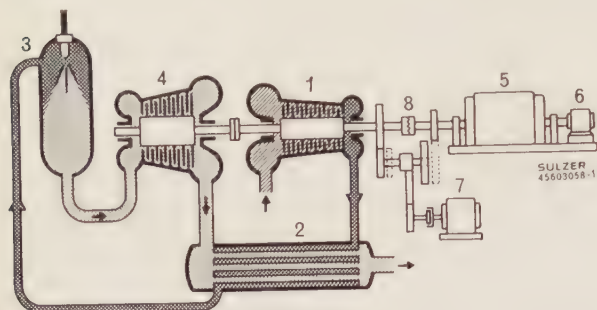


Fig. 4. — Schema del ciclo termico della turbina a gas della centrale di Weinfelden.

1, compressore; 2, recuperatore (riscaldatore d'aria); 3, camera di combustione; 4, turbina; 5, alternatore; 6, eccitatrice; 7, motore di avviamento; 8, innesto magnetico.

la portata dei gas dipende dalla velocità della turbina e se questa è costante ne segue che diminuisce la temperatura dei gas alla entrata in turbina; conseguentemente, ai carichi ridotti, diminuisce anche il rendimento il quale per un carico metà del normale scende a 70 % del rendimento massimo (fig. 5).

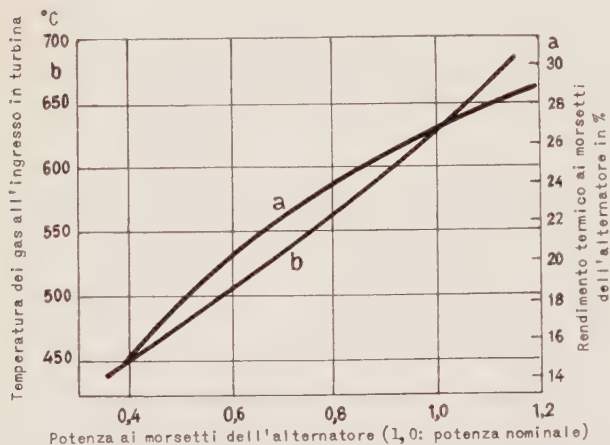


Fig. 5. — Comportamento della turbina a gas ai carichi parziali, a temperatura ambiente di 5 °C a pressione atmosferica costante.
a) riempimento; b) temperatura dei gas.

Anche la temperatura ambiente influisce sul rendimento. A bassa temperatura il peso d'aria aspirato (pari volume) è maggiore e la potenza sviluppata varia pressoché proporzionalmente alla portata di gas che attraversa la turbina (fig. 6).

DISPOSIZIONE GENERALE.

I due gruppi sono disposti affiancati nella sala macchine (fig. 7). La eccitatrice, l'alternatore, il compressore, la turbina, i recuperatori, la camera di combustione e il camino di evacuazione dei gas si trovano disposti su un unico allineamento. Soltanto il motore di avviamento è disposto affiancato all'alternatore. Questa disposizione lineare permette una visione ben chiara ed è favorevole nei riguardi delle dilatazioni termiche.

L'aria viene aspirata da un condotto disposto sotto il pavimento della sala macchine, perpendicolarmente all'asse dei gruppi.

Le macchine elettriche e il compressore sono fissati su fondazioni metalliche, mentre le camere di combustione

sono portate da appoggi elastici. I recuperatori poggiano su fondazioni in calcestruzzo, nel locale sottostante alla sala macchine (fig. 8).

Nella sala macchine sono anche installate 2 caldaie elettriche per il riscaldamento degli ambienti e del combustibile liquido. Nel locale sottostante si trova anche l'officina.

L'edificio quadri della sottostazione all'aperto, addossato a quello principale, contiene 4 pannelli con le apparecchiature necessarie per la regolazione e il servizio degli alternatori.

I compressori sono del tipo assiale a più stadi, a 3 000 giri/min, proporzionati per una portata d'aria aspirata di 100 m³/s. All'uscita dall'ultimo stadio l'aria passa a

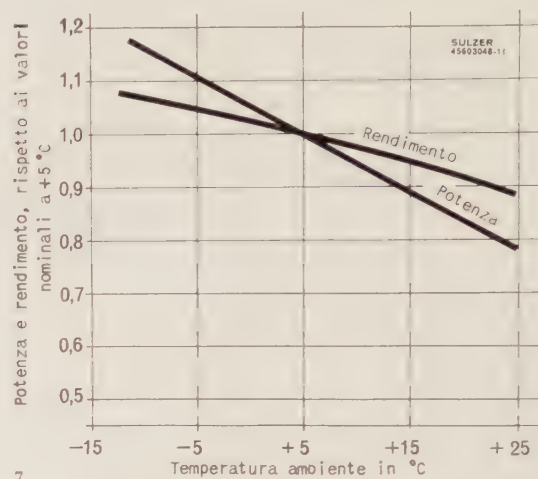


Fig. 6. — Relazione della potenza e del rendimento con le temperature ambiente.

gran velocità nel diffusore nel quale la sua velocità si trasforma in pressione. Il rendimento adiabatico dei compressori supera l'88 %.

I recuperatori sono in numero di 4 per ogni turbina. I gas caldi percorrono un fascio di tubi intorno ai quali circola l'aria, la temperatura della quale viene elevata da 170 °C a circa 320 °C prima di passare alla camera di combustione. I recuperatori risultano apparecchi molto ingombranti e pesanti; per tali ragioni si sono dovuti installare 4 apparecchi in parallelo che pur tuttavia pesano 75 t ciascuno.

La camera di combustione, in lamiera saldata, è costituita da un mantello esterno e da una guaina interna entro la quale il combustibile brucia con una parte dell'aria; la maggior parte dell'aria circola nell'intercapedine fra le due pareti in modo che il mantello esterno deve resistere alla pressione interna e la guaina interna deve resistere alla elevata temperatura. L'aria circolante nell'intercapedine può penetrare in più punti nella camera di combustione dove serve ad abbassare la temperatura a 625÷650 °C. La rimanente parte dell'aria, uscendo dalla intercapedine passa, parallelamente ai gas caldi, con un condotto a doppia parete, dalla camera di combustione alla turbina.

La turbina ha la cassa, divisa orizzontalmente, fusa in acciaio al cromo-molibdeno; il rotore è costituito da un cilindro pieno forgiato di acciaio al 12 % di cromo.

I gas caldi passano nell'interno del condotto di entrata, a doppia parete, nell'intercapedine del quale circola l'aria proveniente dall'intercapedine della camera di combustione la quale protegge il corpo esterno e la estremità frontale del rotore dall'azione diretta delle alte temperature.

Le due prime file di alette del rotore sono in acciaio speciale resistente alle alte temperature, mentre per le file successive basta un acciaio al 13 % di cromo. Il rendimento adiabatico arriva a 90 %.

Le tubazioni dei gas e dell'aria, di rilevanti dimensioni, sono disposte simmetricamente e richiedono soltanto qualche organo di dilatazione.

MACCHINARIO ELETTRICO.

Gli alternatori dei due gruppi, di costruzione Oerlikon, sono costruiti per una potenza di 15 000 kVA e possono

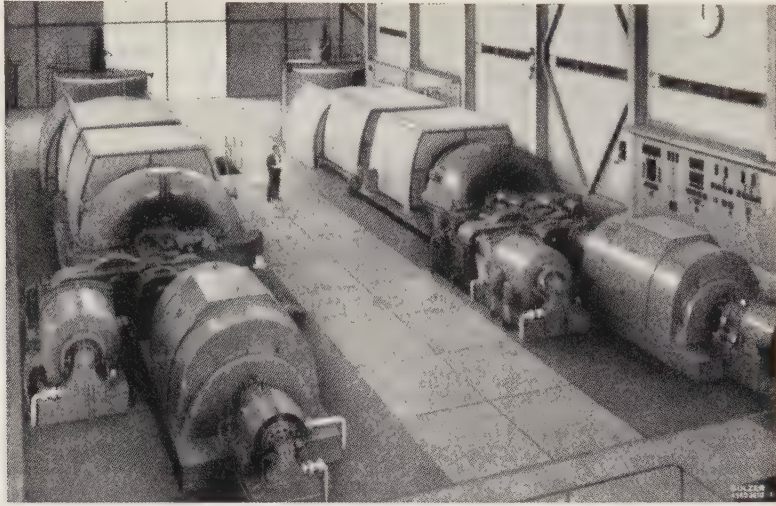


Fig. 7. — Vista della sala macchine.

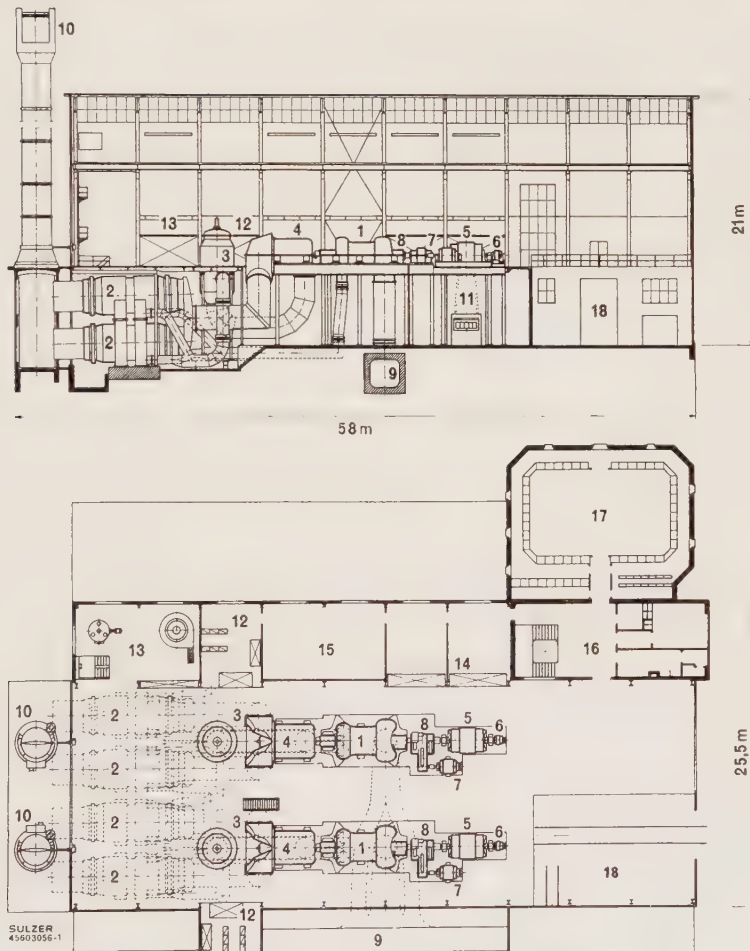


Fig. 8. — Pianta - sezione della centrale.

1, compressore; 2, recuperatore; 3, camera di combustione; 4, turbina; 5, alternatore; 6, eccitatrice; 7, motore di avviamento; 8, innesto magnetico; 9, presa d'aria; 10, camini; 11, refrigerante per l'alternatore; 12, dispositivi di regolazione, quadri; 13, caldaia elettrica; 14, quadri per l'acqua, la ventilazione e serbatoi del combustibile; 15, locali ausiliari; 16, locali per i servizi; 17, quadro di comando; 18, locale montaggio.

I 4 recuperatori di ogni gruppo sono collegati, allo scarico, con una camera di scappamento sormontata da un camino in lamiera alto 35 m.

fornire, come compensatori ruotanti, una potenza reattiva di 12 500 kVar. Sono autoventilanti, con circolazione in circuito chiuso e refrigerante situato direttamente sot-

to alla macchina. Oltre ai soliti dispositivi di protezione sono provvisti di impianto di estinzione incendio a anidride carbonica.

L'eccitatrice, direttamente accoppiata sull'asse dell'alternatore, può fornire una potenza di circa 100 kW.

Il motore di avviamento, a 4 poli, può essere collegato a stella o a triangolo, secondo che si tratti di avviare l'alternatore per il funzionamento come compensatore oppure di portare a velocità la turbina. All'avviamento la turbina richiede soltanto dal 2 al 3 % della sua potenza nominale e basta far funzionare il motore per 3 a 4 minuti; a velocità sufficiente raggiunta, il motore viene automaticamente staccato.

Il dispositivo magnetico di innesto fra turbina e alternatore consiste nella combinazione di una corona dentata, innestabile e disinnestabile con comando idraulico, e di un organo di trasmissione di energia per effetto magnetico.

Quest'ultimo organo (fig. 9) comprende, nella parte fissa, un dispositivo di eccitazione costituito da una armatura 1) e da un avvolgimento 2). L'anello di innesto 3) solidale con l'asse dell'alternatore porta, per mezzo di 2

SERVIZI DELLE TURBINE.

Il combustibile impiegato nelle turbine è nafta pesante con 3 % e oltre di zolfo e fino a 0,05 % di ceneri. È molto denso a temperatura ordinaria e deve essere portato a $70 \div 100^\circ\text{C}$, secondo la qualità, prima di essere mandato ai bruciatori.

Il parco combustibile comprende 3 serbatoi da 5 000 m³, sufficienti per un funzionamento di circa 2 000 ore a pieno carico.

Nella centrale vi sono 2 serbatoi di combustibile, di 5 m³ ciascuno.

Il vapore necessario per il riscaldamento del combustibile è fornito da 2 caldaie, una elettrica e una a nafta. Quando una delle turbine è in funzione, la nafta uscendo dal serbatoio di 5 m³ non viene più scaldata da vapore ma dai gas di scappamento, per mezzo di un serpentino posto all'uscita dai ricuperatori.

Ogni turbina è provvista di 2 pompe per il combustibile, delle quali una è di riserva; la portata delle pompe è costante e il circuito nafta è chiuso in modo che il di più ritorna al serbatoio da 5 m³.

All'estremità libera dell'albero la turbina ha un supporto radiale mentre fra la turbina e il compressore vi è un supporto radiale combinato con un supporto di spinta assiale tipo Mitchell; all'estremità del compressore verso l'alternatore vi è un supporto radiale. Tutti i supporti sono a lubrificazione forzata per mezzo di una pompa elicoidale comandata dall'albero principale della macchina; durante l'avviamento o nel funzionamento come compensatore ruotante, la lubrificazione è affidata a 2 pompe comandate da motori elettrici. All'avviamento si provvede a iniettare olio ad alta pressione provocando un leggero sollevamento del rotore e facilitando così la partenza.

Il consumo d'acqua per le turbine è molto ridotto. La maggiore richiesta è per i refrigeranti dell'aria dei ventilatori; inoltre occorre acqua per il raffreddamento dei supporti, e per altri minori servizi. All'approvvigionamento dell'acqua si provvede con una presa sotterranea provvista di 4 pompe immerse.

DISPOSITIVI DI REGOLAZIONE E DI SICUREZZA (fig. 10).

La regolazione è effettuata a temperatura costante: il carico viene regolato stabilendo la temperatura di regime dei gas all'entrata in turbina, manovrando una leva di regime 30). Da allora in avanti è il regolatore idraulico di temperatura che regola il punto di funzionamento confrontando in modo continuo il valore reale, misurato dal rivelatore idraulico 12), per mezzo di un trasmettitore di pressione, col valore di regime imposto, agendo poi di conseguenza, con un relè pneumatico, sulla valvola di ritorno del combustibile 18) e così sulla quantità di combustibile iniettato nella camera di combustione. Il rivelatore di velocità 34) interviene soltanto come limitatore di sicurezza qualora la velocità della macchina superasse il valore messo a punto nel dispositivo corrispondente 33).

Il grado di apertura della valvola di ritorno del combustibile può anche essere messo a punto manualmente con la leva 36) dopo che il rubinetto di commutazione 37) sia stato messo nella posizione « servizio a mano ».

All'avviamento il rubinetto del combustibile 19) è chiuso; si mette in pressione il dispositivo idraulico di sicurezza primario agendo sul pulsante 23) che apre la valvola principale di sicurezza 22). Il motore di avviamento 7), il dispositivo di accensione 13) e il rubinetto del combustibile 19) sono connessi elettricamente fra loro in

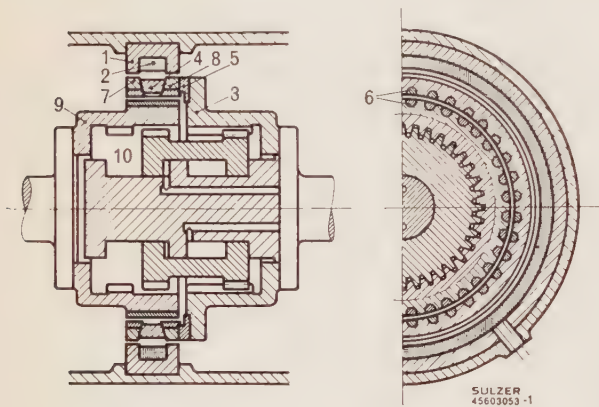


Fig. 9. — Innesto magnetico.

1, sostegno dell'avvolgimento; 2, avvolgimento delle bobine; 3, anello di innesto (lato alternatore); 4, 5, anelli amagnetici; 6, cave; 7, 8, anelli di innesto; 9, semi-innesto (lato turbina); 10, innesto a corona dentata.

anelli intermedi in metallo amagnetico 4) e 5), gli anelli 7) e 8) provvisti di scanalature o cave interne 6) e foranti lo statore, mentre la metà dell'innesto che ruota con l'albero della turbina 9) è provvista, sulla sua periferia, di cave 6) in numero eguale a quelle degli anelli 7) e 8). Le cave dei due organi contengono barre di rame. Applicando la eccitazione, si genera un flusso che percorre il sostegno dell'avvolgimento 1), gli anelli 7) e 8) dello statore e la corona esterna 9) del semiinnesto solidale colla turbina. In caso di diversità di velocità di rotazione delle due parti, le sbarre di rame contenute nelle cave generano una forte coppia che tende ad egualizzare, all'incirca, la velocità delle due parti, analogamente a una macchina sincrona. Quando la velocità delle due parti si approssima al sincronismo, le sbarre tendono a portare le cave, e quindi i denti della corona dentata, in posizione esattamente corrispondente e l'innesto che successivamente avviene conduce il gruppo al sincronismo. Siccome il passo dell'accoppiamento dentato 10) corrisponde esattamente a quello delle cave, l'innesto, una volta raggiunto il sincronismo, può essere effettuato senza difficoltà con un dispositivo idraulico, dopo di che viene interrotta l'eccitazione dell'accoppiamento magnetico.

modo che il rubinetto del combustibile può essere mantenuto meccanicamente in posizione di aperto soltanto dopo avvenuta l'accensione.

L'arresto è prodotto sia con il pulsante 23) sia, in caso di urgenza, dall'intervento del dispositivo idraulico a pressione d'olio. Agendo sul pulsante di arresto 23) si toglie la pressione dell'olio nel sistema di sicurezza primario, e ciò provoca la chiusura della valvola principale 22) e la chiusura del bruciatore 17). Il rubinetto del combu-

desse interamente, le pompe del combustibile vengono automaticamente arrestate.

Il regolatore a azione rapida 39) provoca la chiusura immediata dei bruciatori in caso di velocità eccessiva: il funzionamento di questo dispositivo può venire verificato durante la marcia mediante uno speciale dispositivo di controllo 21).

Altri dispositivi e controlli sorvegliano il funzionamento dei motori e di altri accessori.

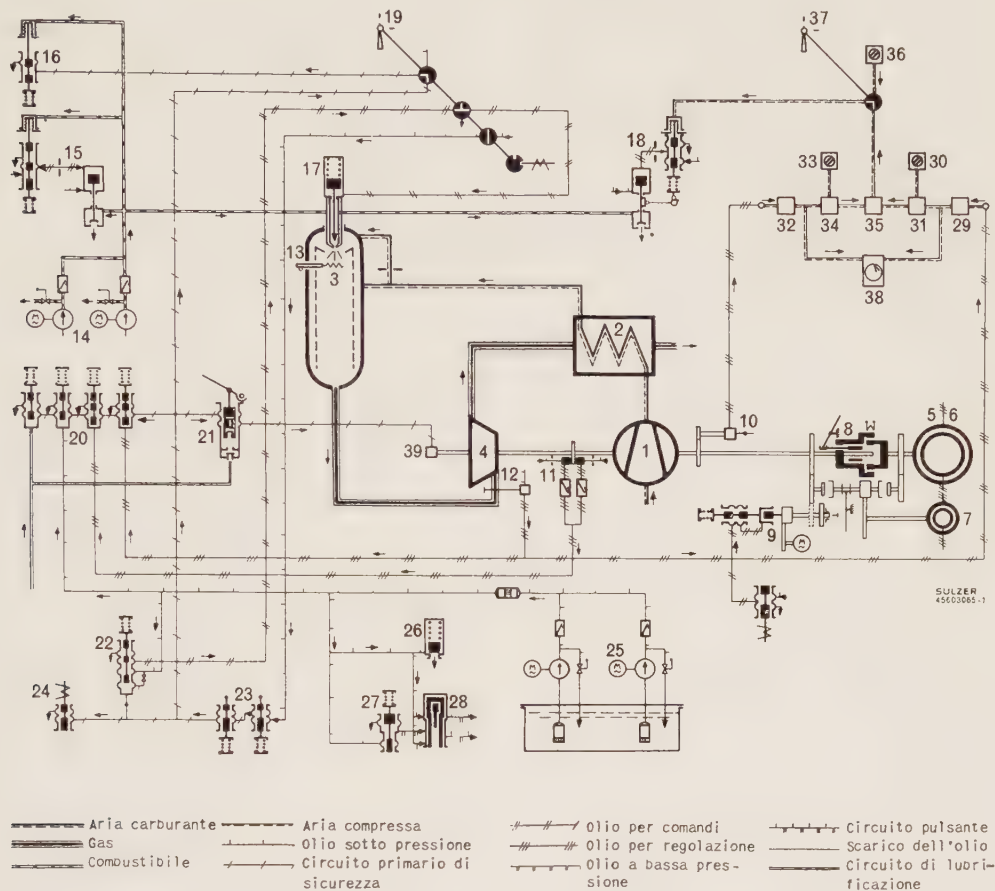


Fig. 10. — Dispositivi di regolazione e sistema idraulico di sicurezza.

1, compressore; 2, ricuperatore; 3, camera di combustione; 4, turbina; 5, alternatore; 6, eccitatrice; 7, motore di avviamento; 8, dispositivo di innesto; 9, viratore; 10, rivelatore di velocità; 11, misura dello spostamento assiale; 12, rivelatore di temperatura; 13, spirale di accensione; 14, pompa combustibile; 15, valvola del combustibile con regolatore; 16, valvola combustibile di sicurezza; 17, bruciatore; 18, valvola di ritorno combustibile con relè ausiliari; 19, rubinetto combustibile; 20, batteria di riserva; 21, dispositivo per controllo della chiusura rapida; 22, valvola di sicurezza principale; 23, valvola di avviamento e di arresto; 24, valvola elettromagnetica del sistema di sicurezza; 25, pompa d'olio di regolazione; 26, pompa di regolazione di pressione a 12 kg/cm²; 27, pompa di regolazione di pressione a 1,8 kg/cm²; 28, apparecchio pulsante di pressione; 29, trasmettitore di temperatura e di pressione; 30, messa a punto del valore di regime della temperatura; 31, regolatore di temperatura; 32, trasmettitore di velocità e di pressione; 33, messa a punto del valore di regime per la velocità; 34, regolatore di velocità; 35, relè addizionale; 36, regolazione manuale; 37, rubinetto di commutazione per servizio manuale o automatico; 38, registratore di temperatura e di velocità; 39, regolatore per la chiusura rapida.

stibile può allora venire riportato in posizione di chiuso e vi resta bloccato finché non riprendano le manovre di avviamento.

Il dispositivo di sicurezza principale provoca l'arresto del gruppo per mezzo degli apparecchi 20) e della valvola di sicurezza principale 22), quando si manifestino valori anormali: delle pressioni dell'olio di regolazione o di lubrificazione, della temperatura di entrata del gas, delle velocità di rotazione.

Attraverso la valvola elettromagnetica 24) il dispositivo di sicurezza elettrica agisce pure sul sistema primario nel caso di estinzione della fiamma, o per valori anormali della temperatura dell'olio o del gas ecc.

Nel caso che il bruciatore, malgrado la soppressione dell'olio nel sistema primario di regolazione, non si chi-

Il sistema di regolazione a olio in pressione è alimentato da 2 pompe comandate da motore elettrico, di cui una di riserva che entra automaticamente in funzione in caso di arresto di quella in servizio.

La valvola di regolazione 26) mantiene costante la pressione, mentre uno speciale apparecchio pulsante vi sovrappone una pressione ondulata che ha lo scopo di sopprimere ogni difficoltà derivante, nei vari apparecchi, dall'attrito di avviamento: la pressione pulsante mantiene tutti gli organi di comando in un leggero movimento di va e vieni.

RISULTATI DI ESERCIZIO.

Il primo gruppo fu messo in marcia, per la prima volta, alla fine ottobre 1959 e il secondo gruppo nel gennaio

1960, senza alcun incidente. Dopo le necessarie messe a punto e verifiche il primo gruppo incominciò il servizio industriale nel novembre 1959, il secondo gruppo nel gennaio 1960.

Le due turbine furono sottoposte a un servizio ininterrotto di 1000 ore a temperatura costante di 625 °C per i gas all'ingresso, senza procedere ad alcuna pulizia delle turbine. Con combustibile avente un tenore di ceneri di 0,028 fino a 0,035 % si constatò, nel primo gruppo alla fine del periodo di 1000 ore, una riduzione di potenza media di circa 7 %. Per il secondo gruppo alimentato con combustibile a 0,005 % di ceneri, la riduzione di potenza fu solamente del 4 %.

In realtà è facile eseguire la pulizia delle turbine dalle ceneri, senza doverle aprire, ma soltanto lasciandole un poco raffreddare. La pulizia si può fare regolarmente nei periodi di arresto, di fine settimana ecc.

Il tempo di avviamento è di circa 20 minuti se il gruppo è completamente freddo e fermo da parecchio tempo; bastano 10 minuti se il gruppo è ancora caldo, come dopo l'arresto di fine settimana.

Per la sorveglianza basta un Capo-sala con uno o due macchinisti aggiunti.

I dati sperimentali raccolti sono i seguenti.

	Gruppo 1	Gruppo 2
Potenza ai morsetti dell'alternatore kW	10 600	10 550
Rendimento ai morsetti dell'alternatore %	27,5	28
Temperatura all'ingresso in turbina <i>Dopo 1000 ore, senza pulizia</i>	620 a 625 °C	
Potenza ai morsetti kW	9100	9850
Rendimento ai morsetti %	26	27
Temperatura all'ingresso in turbina	620 a 625 °C	
Combustibile	Esso 5 α	Esso 4
<i>Produzione di energia fino al 23 marzo 1960</i>		
Energia totale prodotta kWh	14 × 10 ⁶	11 × 10 ⁶
Durata totale di servizio. . . . h	1400	1100
Potenza media kW	9950	10 050
Rendimento termico medio (compresi i periodi di avviam.). %	26,5	27

N.

NOTIZIE SOCIALI

ASSOCIAZIONE ELETTROTECNICA ITALIANA



LXII RIUNIONE ANNUALE 1961

TORINO 17-24 SETTEMBRE 1961

PROGETTO DI PROGRAMMA DELLE MANIFESTAZIONI

Questo programma è suscettibile di ulteriori modificazioni

Il Comune di Torino, la Società Idroelettrica Piemonte, la Azienda Elettrica Municipale, il Consorzio Elettrico del Buthier, la Piemonte Centrale di Elettricità, la Compagnia Imprese Elettriche Liguri, la RAI-TV, le grandi industrie e la sezione dell'AEI hanno già rivolto ai Congressisti l'invito a molteplici manifestazioni di ospitalità. Se queste non vengono espressamente indicate in questo programma, è per evitare omissioni ed attendere le conferme ufficiali.

Domenica, 17 settembre

- Ore 10,00 Inaugurazione solenne a Palazzo Madama (Piazza Castello)
» 15,30 Consiglio Generale nella sede della Sezione di Torino (Via Giolitti, 1)

Lunedì, 18 settembre

Per i Congressisti.

- Ore 9,00 - 12,30 SEDUTE TECNICHE
» 15,00 - 18,30 SEDUTE TECNICHE

Per le Signore.

Escursione a Villar Perosa e al Sestriere

Martedì, 19 settembre

Per i Congressisti.

- Ore 9,00 - 12,30 SEDUTE TECNICHE

Per le Signore.

In mattinata: visita turistica della Città di Torino (1ª parte)

Pomeriggio: libero per visita mostre Italia '61

Mercoledì, 20 settembre

Per i Congressisti.

- Ore 9,00 - 12,30 SEDUTE TECNICHE
» 14,00 Assemblea Generale (I Convocazione)
» 15,00 - 17,30 SEDUTE TECNICHE
» 17,30 Assemblea Generale nella Aula Magna del Politecnico (II Convocazione)

Per le Signore.

In mattinata: escursione alla Sagra di S. Michele e all'Abbazia di S. Antonio di Ranverso

Nel pomeriggio: visita alla Città di Torino (2ª parte)

Ore 20,30 (per le 21,00) Pranzo sociale

Giovedì, 21 settembre

Visite tecniche a industrie ed impianti di Torino e dintorni

In mattinata

FIAT Automobili

Nel pomeriggio

- 1) Sottostazione di Langone e Torino Centro della SIP e centrale idrotermoelettrica di Moncalieri della AEM.
- 2) Reattore di Saluggia della SORIN e centrale termica di Chivasso.

3) CEAT Cavi e Officine di SAVIGLIANO.

4) RIV, centrale telefonica STIPEL e laboratori RAI-TV.

5) FIAT Grandi motori e FIAT Ferriere.

Venerdì, 22 settembre

A) Partenza di un Gruppo per una escursione di tre giorni in Val d'Aosta, con visita agli stabilimenti Olivetti, agli stabilimenti Cogne, alla centrale di Valpelline ed alla diga di Place Moulin del Consorzio Idroelettrico del Buthier ed alle centrali di Quart ed Avise della Società Idroelettrica Piemonte.

B) Escursione di un giorno per la visita agli stabilimenti Olivetti ad Ivrea ed agli stabilimenti Zegna a Trivero. Ritorno a Torino.

Sabato, 23 settembre

A) Continuazione dell'escursione in Val d'Aosta.

C) Escursione di due giorni nella « Provincia Granda » (Cuneo) con visita agli Stabilimenti delle Cartiere Burgo a Verzuolo, alla sottostazione di Savigliano e alla centrale di Demonte della Piemonte Centrale di Eletticità, alle centrali di Pietraporzio e di Vinadio della Compagnia Imprese Elettriche Liguri (CIELI).

Domenica, 24 settembre

A) Continuazione e fine della escursione in Val d'Aosta.

C) Continuazione e fine dell'escursione nella « Provincia Granda ».

Borsa Volta

In base all'esame dei documenti presentati e al colloquio avuto coi singoli candidati, la Commissione giudicatrice costituita dall'AEI per l'aggiudicazione della Borsa Volta per l'anno 1961 aveva prescelto e segnalato ai dirigenti del Volta Memorial Fund una terna di nomi costituita dagli ingegneri Giancarlo Collina, Francesco Donati, Luigi Lanzarotto.

È giunta ora notizia che da parte americana è stato deciso di assegnare la Borsa all'ing. Collina.

Al giovane collega porgiamo cordiali felicitazioni ed esprimiamo la fiducia che sappia mantenere la bella tradizione stabilita da tutti i suoi predecessori che hanno sempre riscosso alto apprezzamento nel nuovo ambiente in cui si sono trovati ottenendo ottimi risultati nei loro studi presso le Università americane.

Riteniamo interessante riportare qui alcuni brani di una lettera che ci è pervenuta dall'ing. Franco Mariotti, che conseguì la Borsa nello scorso anno e che si trova tuttora negli Stati Uniti.

« Sono stato iscritto, per i semestri autunnale e primaverile, alla Università di California, in Berkeley.

« La maggioranza dei corsi aveva come oggetto il Controllo Automatico e, dopo la compilazione di una tesi finale, mi è stato conferito il titolo di Master of science in Electrical Engineering, a pieni voti, il giorno 10 giugno 1960.

« Dietro suggerimento di alcuni dei miei professori, ho presentato il 10 giugno un condensato della mia tesi per la pubblicazione sulle "AIEE Transactions on Automatic Control". Con mia grande soddisfazione ho ricevuto pochi giorni fa la notizia che l'articolo è stato accettato e sono stato invitato a presentarlo al congresso generale dello American Institute of Electrical Engineers che si terrà a Chicago dal 10 al 14 ottobre 1960.

« Devo fin d'ora esprimere il mio più sentito ringraziamento alla AEI per avermi fornito questa meravigliosa occasione di entrare in contatto con un ambiente scientificamente e tecnicamente tanto progredito come quello universitario americano.

« Ho riportato tuttavia l'impressione, forse troppo immodesta, che la tradizione e la sana preparazione della Scuola Italiana può trovare qui facilmente terreno fertile per fiorire ed emergere. Credo sinceramente che un'iniziativa come la Borsa Volta debba essere debitamente sostenuta, incoraggiata e possibilmente diffusa ».

Siamo lieti dell'apprezzamento fatto dell'utilità della Borsa e ci congratuliamo cordialmente con l'ing. Mariotti per il brillante esito dei suoi studi.

NOTIZIE DELLE SEZIONI

SEZIONE ADRIATICA

Mercoledì 22 febbraio ha avuto luogo a Macerata una riunione dei Consoci residenti nella provincia di Macerata. L'ing. Giunchi, nella sua qualità di Presidente, ha intrattenuto gli intervenuti sull'andamento della nostra Sezione esortando tutti a partecipare attivamente alla vita della Associazione.

*

Il 25 marzo 1961 l'ing. **Getulio Emanuelli**, già Direttore dei Servizi Primari dell'Unes nelle Marche, ha tenuto alla Loggia dei Mercanti di Ancona una conferenza sul tema: « La scoperta e l'utilizzazione dell'energia nei secoli ». L'o-

ratore ha sviluppato la sua interessante relazione partendo dalla primitiva energia muscolare e trattando via via dell'energia potenziale dell'acqua corrente, del vento, di quella del carbone, del petrolio è giunto all'energia elettrica ed infine a quella più recente: l'energia nucleare; accennando anche agli studi in corso per ricavare energia elettrica dalle irradiazioni solari.

L'oratore ha elencato molte applicazioni con speciale riguardo alla conquista ed applicazione dell'energia elettrica, del suo sorgere nell'ultimo decennio dello scorso secolo ai nostri giorni e delle recenti pratiche applicazioni dell'energia nucleare. La conferenza è stata seguita da 142 proiezioni di apparecchiature ed impianti elettrici italiani e stranieri; da quelli sorti al principio di questo secolo ai più recenti, completati da numerose opere d'ingegneria idraulica e di complessi elettronucleari.

Alla fine l'oratore è stato vivamente applaudito.

*

SEZIONE DI CATANIA

Il 24 febbraio 1961 alle ore 17,30, in seconda convocazione, nell'aula delle lezioni del Centro Siciliano di Fisica Nucleare si è riunita l'Assemblea generale dei soci della sezione di Catania per discutere il seguente

ORDINE DEL GIORNO

1. - Comunicazioni.
2. - Bilancio.
3. - Varie.

Apres la seduta il Presidente della sezione ing. Carciotto che si compiace per il rilevante numero di intervenuti a cui porge il suo cordiale saluto.

Riassumendo l'attività della sezione nello scorso anno, che ha definito soddisfacente, esprime il suo rammarico per le difficoltà frapposte dalle varie circostanze alla realizzazione della gita ai laghi della Sila ed agli impianti idroelettrici del Mucone, che, confidando nell'entusiasmo dei soci, mantiene in programma per il corrente anno. Fa presente che ha avuto ripetuto l'invito di una visita agli stabilimenti della SINCAT di Priolo e spera che esso sia bene accolto dai soci. Riferisce sul programma di attività culturale e rinnova le più calde sollecitazioni di collaborazione specie ai soci più giovani.

Commemora quindi i soci scomparsi ing. Costanzo Carmelo e ing. Ricca Salvatore ricordando, del primo, la lunga e brillante attività professionale e di docente, e del secondo giovanissimo, le belle doti dell'ingegno, la squisitezza d'animo e la cordiale stima che gli serbavano i colleghi dell'ESE.

Conclude invitando i presenti ad un breve raccoglimento per la loro memoria.

Poi il Presidente passa ad illustrare la situazione dei soci sottolineando l'elevato numero (14) dei soci perduti durante l'anno, per morte, dimissioni, irreperibilità e morosità che non sono compensati dalla unica nuova iscrizione e dai quattro acquisti per trasferimento da altre sedi. Sicché il numero degli iscritti per il 1961 resta ridotto a cento.

Sul bilancio consuntivo del 1960 si constata che l'incidenza negativa di sette soci morosi e la bassa quota sociale (quasi totalmente assorbita dai contributi della sezione verso l'U.C.) hanno ridotto a sole L. 11.320 il residuo attivo

della sezione per il 1961, che si è potuto realizzare grazie alle ridottissime spese di gestione ed alla graziosa ospitalità della sezione da parte del C.S.F.N. che il Presidente sentitamente ringrazia. Aperta la discussione sul bilancio e chiarita la necessità di aumentare le quote sociali per l'anno 1961, dopo la lettura delle cifre, questo viene approvato ad unanimità.

Il Presidente esorta i soci ad accogliere favorevolmente l'offerta di abbonamento alla rivista «Alta Frequenza» a prezzo ridotto proposta dal Presidente Generale. E insiste nella sollecitazione di ricercare nuove ed efficaci adesioni nell'ambito di attività di ogni socio e di collaborare con la Presidenza Generale a indirizzare gli studenti universitari del ramo scientifico verso l'elettrotecnica e le sue applicazioni, che sono in rapido progresso inscrevendoli quali soci Juniores del nostro sodalizio.

Dopo vari e cordiali scambi di idee fra gli intervenuti, alle ore 19 la seduta è stata tolta.

✱

Il giorno 20 gennaio 1961 il dr. ing. **Dino Battaglia** della «Soc. Magrini» di Bergamo, ha tenuto una conferenza sul tema: «**Studi e realizzazioni pratiche della più recente tecnica della costruzione di interruttori per medie e grandi potenze ad esafluoruro di zolfo**».

L'esafluoruro di zolfo (SF_6) è un gas alogeno, inerte, non tossico, non corrosivo, non infiammabile, di densità pari a 5 volte quella dell'aria. Si decompone in minima quantità in presenza dell'arco; i prodotti di decomposizione sono però isolanti. Qualche prodotto di decomposizione è tossico, ma nelle concentrazioni in cui si presenta in pratica non presenta neppure pericolo di irritazione.

L' SF_6 ha una conduttività termica 2,5 volte maggiore di quella dell'aria. Anche la sua rigidità dielettrica è più volte superiore a quella dell'aria; la causa principale di questo fenomeno sembra essere la spiccata elettronegatività di questo gas cioè la forte affinità delle molecole dell' SF_6 per gli elettroni liberi.

L' SF_6 presenta anche una eccezionale capacità di estinzione dell'arco, il cui ordine di grandezza è pari a 100 volte quella dell'aria.

Questa caratteristica è legata, oltre che all'elettronegatività, al valore notevolmente basso delle costanti di tempo relative alla temperatura e alla conduttività elettrica della zona d'arco.

Tale dipendenza della capacità di estinzione dell' SF_6 dalle caratteristiche fisiche è stata particolarmente illustrata in base ai più recenti studi sull'argomento.

Si è poi passato ad una descrizione sommaria della produzione attuata dalla Westinghouse El. Co. dal 1953 ad oggi in fatto di apparecchiatura impiegante SF_6 .

È stato descritto il sezionatore sotto carico per esterno tipo VLB per tensioni da 15 a 160 kV, corrente nominale 600 A; il coltello di messa a terra ultrarapido per 196 kV, 20 000 A, gli interruttori per 115 kV, 1 000 MVA e 46 kV, 250 MVA.

Sono stati poi in particolare illustrati i due interruttori per 150 kV, 10 000 MVA e per 220 kV, 15 000 MVA, costruiti ora anche in Italia dalla Magrini S.p.A.

Caratteristiche di tali interruttori è di usare il gas SF_6 in circuito chiuso, mediante un compressore autonomo che, al momento opportuno aspira gas dal lato bassa pressione per comprimerlo nel lato alta. Il gas alta pressione si riversa sull'arco durante la manovra, espandendosi nel serbatoio a bassa pressione. Questi interruttori hanno il complesso d'interruzione, formato da due o tre camere in serie, immerso nel gas contenuto in un serbatoio orizzontale, a massa.

La corrente giunge alle camere tramite due passanti, sui quali sono calzati i trasformatori di corrente toroidali. Caratteristiche delle manovre d'interruzione su tali interruttori sono: l'assenza di rumore, l'assenza di manifestazioni esterne, la costanza del potere d'interruzione per ogni manovra indipendentemente dal valore della corrente e dal numero di manovre eseguite, dato il trascurabile valore della decomposizione del gas con l'arco.

La manutenzione di questi interruttori è ridottissima e facilitata dal fatto che il complesso d'interruzione si può sfilare dal serbatoio su due rotaie a livello di terra.

Dopo aver mostrato alcuni risultati delle prove su tali in-

terruttori si è fatto un accenno ai più recenti tipi e precisamente il tipo per 69 kV, 5 000 MVA e quello per 161 kV, 15 000 MVA basati su un principio simile a quello usato per i precedenti; i tipi da 35 kV e 45 kV, 500 MVA basati invece sul più semplice principio del pistone autosoffiante che genera quella piccola pressione necessaria allo spegnimento dell'arco durante la manovra stessa; i poli di tali interruttori sono formati da due isolatori orizzontali legati ad una flangia centrale in cui è contenuta la camera e attorno alla quale sta il riduttore di corrente toroidale.

Al termine della esposizione il conferenziere è stato vivamente applaudito.

✱

SEZIONE DI MILANO

Mercoledì 22 febbraio, il signor **J. Green** della Collins Radio Company ha parlato sul tema:

«Comunicazioni intercontinentali a mezzo satelliti»

La conferenza, in lingua inglese, era organizzata dalla sezione di Milano dell'AEI in collaborazione con la sezione italiana dell'IRE.

Nel trattare della necessità di uno sviluppo delle telecomunicazioni via satelliti, l'oratore ha messo in luce come l'attuale situazione delle comunicazioni intercontinentali sia inadeguata ai bisogni di un prossimo futuro. La trasmissione via satelliti prospetta soluzioni adeguate ad urgenti ed attuali problemi ed il progetto americano ECHO I dimostra come tali soluzioni siano tecnicamente possibili. Sorgono pertanto, per poter utilizzare su scala internazionale questo mezzo di comunicazione, una serie di problemi di ordine politico e giuridico che devono essere risolti dalla collaborazione di tutte le nazioni interessate.

Il signor Green ha mostrato, servendosi tra l'altro di proiezioni fotografiche, i principali risultati raggiunti col satellite passivo ECHO ed ha accennato ai progetti futuri che prevedono, tra l'altro il lancio di satelliti attivi su orbite anche molto differenti da quella utilizzata per l'ECHO.

A conclusione della interessante conferenza, l'oratore ha affermato che è convinzione dei tecnici americani che per il 1965 i sistemi di comunicazione via satelliti saranno operanti su scala commerciale: è pertanto necessario che anche le nazioni europee formulino un piano operativo per potersi inserire in una posizione di compartecipazione nei programmi internazionali.

✱

SEZIONE VENETA

Il giorno 22 febbraio nell'Aula di Elettrotecnica della Scuola di Ingegneria dell'Università di Padova il prof. ing. **Giuseppe Zingales** dell'Istituto di Elettrotecnica dell'Università di Padova, ha tenuto una interessante conferenza dal titolo «**Riduttori capacitivi per linee ad alta tensione**».

Premesse alcune considerazioni generali sui criteri di sicurezza, economia e flessibilità di impiego che hanno portato ad un rapido sviluppo delle applicazioni dei riduttori capacitivi, l'oratore ne ha brevemente illustrato il principio di funzionamento e la teoria degli errori. Egli ha messo in particolare evidenza come sia possibile realizzare apparecchi aventi caratteristiche di precisione, prestazione e campo di frequenza adatti per qualsiasi pratico impiego, ma come ognuno di questi requisiti si traduca quasi direttamente in un maggior onere economico.

È stato poi brevemente illustrato il comportamento dei riduttori capacitivi di fronte ai transitori di manovra e le loro caratteristiche per l'impiego con dispositivi di protezione selettiva ad azione rapida.

L'oratore ha infine inquadrato i fenomeni non lineari che possono prodursi nell'apparecchiatura per la presenza di circuiti magnetici soffermandosi in particolare sulla origine e sulla natura delle oscillazioni subarmoniche; la conoscenza di questi fenomeni è essenziale per poterne prevedere l'insorgere, specie in seguito ai transitori e per poter disporre adeguati sistemi di protezione.

Vari interventi sono seguiti alla brillante esposizione che è stata vivamente applaudita dai numerosi presenti.

COMITATO ELETTROTECNICO ITALIANO

C. E. I.

Riunioni dei Sottocomitati e delle Commissioni di Studio del CEI avvenute nel mese di Aprile del 1961

presso la sede del CEI o in altra sede specificata

5 aprile, ore 15 - Sottocomitato 11 « Impianti » - Commissione XI/11 « Impianti elettrici in locali con pericolo di esplosione o di incendio » - Commissione di Redazione; presiede dr. ing. G. E. Niccoli.

— Esame appendici.

6 aprile, ore 15 - Sottocomitato 109 « Controllo statistico di qualità » - Gruppo di lavoro; presiede prof. P. Sillano.

— Revisione Supplemento Norme per il campionamento per attributi.

7 aprile, ore 15 - Sottocomitato 2 « Macchine elettriche rotanti » - Commissione 2F « Spazzole »; presiede prof. L. Merigliano.

1) Esame situazione.

2) Inizio esame documento del Sottocomitato 2F IEC dal 2F (Sweden) in poi.

3) Proposte lavoro futuro.

10 aprile, ore 9 - Sottocomitato 11 « Impianti » - Riunione plenaria; presiede on. prof. N. Faletti.

1) Comunicazioni del Presidente.

2) Stato attuale dei lavori delle varie Commissioni e programmi futuri.

13 aprile, ore 10 - Sottocomitato 41 « Relè » - Riunione plenaria; presiede prof. A. Parrini.

1) Relazione sui lavori M.E.C.

2) Partecipazione alle riunioni di Interlaken.

3) Risposta al questionario sui trasformatori di tensione.

18 aprile, ore 9,30 - Sottocomitato 103 « Telefonia » - Commissione C « Onde convogliate A.T. » - Gruppo di Redazione; presiede dr. ing. E. Sailer.

— Norme sulle stazioni terminali per impianti a onde convogliate.

19 aprile, ore 9,30 - Sottocomitato 33 « Condensatori » - Riunione plenaria; presiede dr. ing. E. Carapezza.

— Esame progetto Norme nazionali.

19 aprile, ore 15 - Sottocomitato 15 « Materiali isolanti » - Riunione plenaria; presiede dr. ing. A. Ruelle.

1) Esame prima bozza Progetto Norme « Impianti incombustibili per uso elettrotecnico ».

2) Attività internazionale.

3) Situazione lavori per l'approntamento norme del Sottocomitato 15 CEI.

20 aprile, ore 9,30 - Comm. mista UNIFER-CEI « Terminologia di trazione elettrica »; presiede dr. ing. G. Del Guerra.

— Esame lavoro preparatorio predisposto dai membri della Commissione.

21 aprile, ore 14,30 (presso ufficio prof. Bottani, via A. Saffi, 15 - Milano) - Sottocomitato 17 « Grossa apparecchiatura » - Commissione « Interruttori corrente alternata A.T. »; presiede prof. E. Bottani.

— Esame bozza Norme per gli interruttori a corrente alternata per tensione superiore a 1000 V.

22 aprile, ore 10,30 - Sottocomitato 12 « Radiocomunicazioni » - Riunione plenaria; presiede gen. prof. C. Matteini.

1) Relazione del Segretario prof. Paolini sull'attività internazionale svolta nel 1960-61.

2) Relazione dei Presidenti di Commissione sui lavori svolti.

3) Comunicazioni del Presidente sulla riorganizzazione di tutti i Sottocomitati che si occupano di correnti deboli.

4) Programma sui lavori futuri.

26 aprile, ore 9,30 - Sottocomitato 17 « Grossa apparecchiatura » - Commissione « Sezionatori »; presiede dr. ing. A. Brambilla.

— Impostazione rifacimento Norme CEI 17-4 « Sezionatori in aria con interruzione visibile » sulla base delle Norme IEC di imminente pubblicazione.

26 aprile, ore 10,30 (presso Registro Italiano Navale, via XX Settembre, 8 - Genova) - Sottocomitato 18 « Impianti elettrici di bordo » - Riunione plenaria; presiede dr. ing. G. Sadowski.

1) Formazione della delegazione italiana alla prossima riunione di Stoccolma del Comitato 18 IEC (12-18 giugno 1961).

2) Discussione sui seguenti argomenti interessanti le norme internazionali IEC sugli impianti elettrici di bordo:

a) navi petroliere;

b) accumulatori;

c) punti lasciati in sospeso nelle precedenti riunioni;

d) messa a terra dei neutri;

e) raccomandazioni presentate da Sottocomitati o da Gruppi di lavoro « ad hoc »;

f) linee di fuga e distanze in aria;

g) esame dei documenti già pervenuti da parte di vari Comitati nazionali.

27 aprile, ore 15 - Sottocomitato 11 « Impianti » - Commissione XI/11 « Impianti elettrici nei locali con pericolo di incendio o di esplosione » - Gruppo Redazione; presiede dr. ing. G. E. Niccoli.

— Esame appendici.

28 aprile, ore 10,30 - Sottocomitato 42 « Tecnica delle prove ad A.T. » - Riunione plenaria; presiede prof. F. Barozzi.

1) Prosecuzione discussione del doc. 42 (C.O.) 6 IEC.

2) Voto generale sul documento.

*

Armonizzazione delle norme nazionali riguardanti il materiale elettrico, fra i Paesi europei

INIZIO DELL'ATTIVITÀ IN SENO AL MEC (1958-1960).

A tutti è noto che le divergenze esistenti fra le varie norme nazionali specificanti la costruzione ed il collaudo delle apparecchiature, costituiscono una dannosa barriera che forma un grave ostacolo agli scambi internazionali.

Questo problema è stato molto sentito nel campo del materiale elettrotecnico e soprattutto fra i cinque principali paesi aderenti al Mercato Comune Europeo (Francia, Belgio, Olanda, Repubblica Federale Tedesca e Italia). Fin dall'Ottobre del 1958 i rappresentanti dei competenti Enti di normalizzazione del materiale elettrico dei detti cinque Paesi del MEC, hanno attuato una serie di riunioni ed hanno iniziato il difficile lavoro di armonizzazione delle norme, consci dell'importanza e dell'urgenza di giungere a specifiche sostanzialmente comuni.

Si è dapprima affrontato il lavoro solamente su 10 argomenti, scegliendoli fra quelli di maggior importanza ai fini degli scambi internazionali e per ognuno di essi si è presa come campione una Specificazione internazionale (IEC o CEE) già esistente.

Verso la fine dello scorso anno i lavori relativi ai tre argomenti seguenti: Macchine rotanti, Trasformatori di sicurezza e Interruttori ad alta tensione, erano quasi terminati, nel senso che i cinque Paesi erano invitati a modificare le proprie norme nazionali eguagliandole ad uno schema comune costituito da quelle internazionali con alcune varianti.

Un ulteriore sviluppo a questo lavoro si è avuto nello scorso anno col tentativo di estendere l'armonizzazione delle norme anche ai Paesi della zona del libero scambio (EFTA). Infatti nei giorni 10 ed 11 ottobre si riunivano a Milano nella sede del Comitato Elettrotecnico Italiano, i rappresentanti di 12 Paesi europei, rispettivamente i cinque ricordati del MEC, sei della Zona del Libero Scambio (Austria, Danimarca, Gran Bretagna, Norvegia, Svezia, e Svizzera) nonché un osservatore (Finlandia).

RESOCONTO DELLA RIUNIONE DI MILANO (10-11 OTTOBRE 1960)
FRA I PAESI DEL MEC E DELL'EFTA.

È subito apparso che il lavoro di armonizzazione delle norme nazionali se era difficile e di esito incerto fra i 5 Paesi del MEC, avrebbe presentato ancora maggiori difficoltà estendendo il numero delle nazioni. Nonostante questo, i Paesi del MEC si sono dichiarati pronti a collaborare con i Paesi dell'EFTA su qualsiasi argomento, escludendo solamente quei tre sopracitati per i quali l'armonizzazione era praticamente ultimata. D'altra parte i Paesi dell'EFTA hanno dichiarato che fra loro non era stata ancora presa alcuna iniziativa per l'armonizzazione delle norme e che i soli Paesi scandinavi avevano iniziato qualcosa in proposito. I Paesi EFTA si sono quindi dichiarati disposti ad accettare le proposte dei Paesi MEC ed hanno accettato di eseguire il lavoro con la stessa procedura fino allora usata da questi ultimi. Si è pertanto deciso di affidare ad ogni Paese un argomento di studio e di prendere come riferimento una norma internazionale esistente (IEC o CEE). Ogni Paese dovrà dichiarare quali punti della norma campione esso non potrà accettare; su queste basi avranno luogo degli incontri fra gli esperti delle varie nazioni per giungere a delle decisioni da tutti accettabili.

Poiché i Paesi del MEC-EFTA costituiscono la quasi totalità dei membri della CEE (Commission Internationale de Réglementation en vue de l'Approbation de l'Équipement Electrique), tutti i Paesi rappresentati hanno accettato che nel caso di norme rientranti nel campo di quest'ultima, il lavoro tecnico per l'armonizzazione venga svolto dalla stessa CEE. Quando gli esperti avranno raggiunto un accordo sui punti divergenti, i vari enti normalizzatori nazionali dovranno approvare la nuova norma comune, impegnandosi, entro un dato termine, a modificare in conseguenza la propria norma nazionale. La conclusione di questa procedura dovrebbe poi portare alla richiesta di modifica anche della norma internazionale (IEC o CEE).

Durante la riunione è stato ripetutamente sottolineato che la riuscita di questo lavoro di armonizzazione dipenderà soprattutto dalla buona volontà dei singoli Paesi nel rinunciare per l'interesse comune, a tutte quelle deviazioni che non siano ritenute essenziali. Ciò esigerà sforzo da parte di tutti, ma l'attuale situazione economica e politica dei Paesi europei lo richiede.

Da ultimo sono stati scelti gli argomenti coi quali iniziare questa collaborazione. Essi sono i seguenti:

Prese a spina per uso domestico, affidato al Belgio. — Il lavoro tecnico verrà condotto in seno alla CEE prendendo come campione la Pubblicazione n. 7 della CEE. (Spécifications pour les prises de courant pour usages domestiques et analogues).

Conduttori isolati, affidato all'Olanda. — Anche per questo argomento il lavoro tecnico si svolgerà in seno alla CEE prendendo come campioni la Pubblicazione n. 2 (Spécifications pour les conducteurs isolés au caoutchouc) e la Pubblicazione n. 13 (Spécifications pour les conducteurs isolés au chlorure de polyvinyle).

Lampade ad incandescenza, affidato alla Gran Bretagna. — La norma campione sarà la Pubblicazione n. 64 della IEC.

Al termine della riunione si è ribadita la speranza nella riuscita di questo primo tentativo di armonizzazione delle norme e si è precisato che in caso negativo i Paesi del MEC saranno liberi di proseguire l'armonizzazione fra loro.

SVILUPPI SUCCESSIVI.

Mentre si sono iniziati i lavori come stabilito nella riunione di Milano, altri due argomenti già in precedenza studiati dai Paesi del MEC, sono stati estesi ai Paesi dell'EFTA per attuarne l'armonizzazione delle norme:

Apparecchi domestici a motore, affidato alla Germania. — Norma campione la Pubblicazione CEE n. 10 (Spécifications

pour les appareils électriques à moteur pour usages domestiques et analogues).

Piccoli interruttori domestici, affidato al Belgio. — Norma campione la Pubblicazione CEE n. 14 (Spécifications pour les interrupteurs pour usages domestiques et analogues).

NECROLOGI

Sabato 4 febbraio 1961, a soli 55 anni, è mancato dopo breve malattia, il sig.

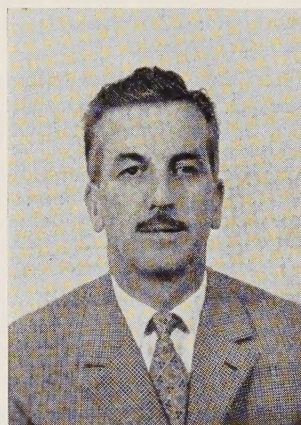
ALDO CARIBONI

Consigliere Delegato della Società per Azioni Osvaldo Cariboni Lecco.

Aldo Cariboni nacque nel 1906 a Colico, secondogenito di una numerosa famiglia, che visse oltrechè nell'America del Nord, a Milano ed a Lecco, dove svolse la propria attività industriale.

Il padre Osvaldo Cariboni fu il fondatore della Società e pioniere della elettrificazione ferroviaria, in quanto prese parte ai lavori della prima ferrovia elettrica italiana (la Valtellinese), della London Ontario-Pittsburg e della ferrovia aerea di New York in America.

L'illustre scomparso, esperto ed apprezzato conoscitore del settore industriale elettromeccanico, era soprattutto assai benivolo per le sue doti altamente sociali, per la sua semplicità e rettitudine, bontà e generosità verso tutti, virtù



che gli avevano creato una vasta schiera di amici ed estimatori.

Di temperamento molto sportivo, fu socio fondatore dello Sci Club Lecco; svolse una intensa attività alpinistica sia come rocciatore, sia come sciatore; fu per molti anni membro del Consiglio Direttivo della Sezione CAI di Lecco ed ebbe parte preminente nella ricostruzione dei rifugi alpini distrutti nel corso delle operazioni belliche dell'ultima guerra, durante la quale fece parte del Comitato di Liberazione Nazionale della zona.

Per il miglioramento e un maggior impulso dell'attività e della produzione industriale in questi ultimi anni intraprese con entusiasmo numerosi viaggi all'estero, recandosi in Francia, Svizzera, Germania, Stati Uniti e Unione Sovietica.

Attualmente era Consigliere della Unione Industriali Leccesi, socio dell'ASSOMET, ANIPLA, ANIE, UNI, membro inoltre del Lyons Club e del Circolo Sociale di Lecco.

È scomparso così prematuramente dopo una vita interamente dedicata al culto degli affetti famigliari ed al lavoro, del quale fu costante animatore apportando la sua fervida e appassionata collaborazione nell'azienda che diresse coi fratelli, illuminato dalle Sue straordinarie capacità e spirito di abnegazione.

Apparteneva dal 1956 all'AEI che si associa al cordoglio di quanti lo conobbero.

* *

È morto a Milano, il 14 gennaio 1961 il socio:

ing. GIOBATTÀ CELOTTI

Nato a Treviso il 27-6-1879 dopo gli studi elementari a Treviso e quelli medi a Venezia, si laureò ingegnere meccanico al Politecnico di Milano nel 1902.

Trascorse un breve inizio di carriera nel campo tessile e metallurgico, passò nel 1906 alla Trazione Elettrica presso le Tramvie Interprovinciali di Treviso, per poi dedicarsi al ramo che doveva fare di lui l'apprezzato progettista di macchine elettriche.

Fu presso la Società AEG Thomson Houston, divenuta poi Galileo Ferraris ed infine incorporata nella Compagnia Generale di Elettricità, dove si occupò della costruzione e del calcolo delle macchine rotanti, sia a corrente alternata sia continua, e dove rimase in seguito come Capo dell'Ufficio Impianti Industriali fino al 1935.

Passò successivamente al Tecnomasio Italiano Brown Boveri, dove ebbe occasione di sviluppare la sua già notevole esperienza nel campo delle macchine elettriche occupandosi del calcolo dei grandi alternatori. Si dedicò a questa attività con successo ed encomiabile zelo fino alla fine del 1956.

Era socio dell'AEI dal 1904 ed era stato nominato socio « Emerito » dal 1954. Lascia in tutti coloro che lo conobbero vivo rimpianto.

ATTIVITÀ DELLE SEZIONI

SEZIONE ADRIATICA (Via Palestro, 4 - Ancona).

8 febbraio 1961 — Riunione dei Consoci residenti nella zona di Fermo e informazione dell'andamento della sezione da parte del Presidente GIUNCHI.

SEZIONE DI BOLOGNA (Borsa di Commercio, 24 B).

11 marzo 1961 - ore 18,30 — Conferenza del prof. ing. Antonio LEPSCHY, sul tema: « Circuiti elettrici per la soluzione di taluni problemi matematici ».

8 aprile 1961 - ore 17 in prima convocazione e ore 17,30 in seconda convocazione: Assemblea ordinaria dei Soci.

8 aprile 1961 - ore 18,30 — Conferenza del prof. ing. Giuseppe FRANCINI, sul tema: « Recenti dispositivi a semiconduttori ».

SEZIONE DI CATANIA (Corso Italia, 23).

24 febbraio 1961 - ore 17 in prima convocazione e ore 17,30 in seconda convocazione: Assemblea ordinaria dei Soci.

SEZIONE DI FIRENZE (Via Valfonda, 9).

7 aprile 1961 - ore 18,15 — Conferenza del prof. Guglielmo RIGHINI, sul tema: « Primi risultati dell'eclissi del 15 febbraio ».

SEZIONE DI GENOVA (Piazza Fontane Marose, 6).

1^o ottobre 1960 — Visita agli impianti per la costruzione della centrale idroelettrica di Isola Serafini sul fiume Po.

20 gennaio 1961 — Conferenza del dr. ing. Antonio CINTERO, sul tema: « Autotrasformatori per la interconnessione di reti ».

8 marzo 1961 - ore 21 — Conferenza dei dr. ingg. Raoul LONG e Arturo BLOTTO FINADRI, sul tema: « L'ammodernamento dell'azionamento elettrico del blooming e del treno 850 dell'impianto di Piombino della Società ILVA ».

14 marzo 1961 - ore 18 — Conferenza del dr. ing. Emilio CELASCHI, sul tema: « Particolari costruttivi, materiali e orientamenti nella costruzione delle moderne turbine a vapore in impianti fissi ».

SEZIONE DI LIVORNO (Scali D'Azeglio, 8).

24 marzo 1961 - ore 18 — Proiezione dei seguenti documenti: « Nascita di un microsolco », « Tecnica dell'avvenire », « L'automazione in Italia », « L'automazione in America », « L'elettrificazione rurale », « Esplorazione dello spazio ».

22 aprile 1961 - ore 17 — Assemblea annuale dei Soci. È seguita una conferenza tenuta dal prof. ing. Giuseppe MELINOSI, sul tema: « Verifica del rendimento delle turbine idrauliche col metodo termoelettrico ».

SEZIONE DI MILANO (Via S. Tomaso, 3).

20-24 marzo 1961 — Viaggio collettivo in U.S.A.

2 marzo 1961 - ore 21 — Conferenza dei dr. ingg. Agostino BERGAMASCO e Mario BALDASSARRINI, sul tema: « Gli aspetti tecnici più tipici della costruzione dell'impianto di Kariba ». La conferenza è stata illustrata da diapositive e seguita dalla proiezione di un documentario.

9 marzo 1961 - ore 21 — Conferenza del dr. ing. Massimo GONNI, sul tema: « L'impianto siderurgico a ciclo integrale dell'Orinoco ». La conferenza è stata seguita dalla proiezione di un documentario.

10 marzo 1961 - ore 15 — Visita agli impianti dell'ENI a Metanopoli.

16 marzo 1961 - ore 21 — Conferenza del dr. ing. Giovanni PARIGI, sul tema: « I semiconduttori nei gruppi raddrizzatori di potenza ».

23 marzo 1961 - ore 18,30 in prima convocazione e ore 20,30 in seconda convocazione: Assemblea ordinaria dei Soci.

23 marzo 1961 - ore 21,15 — Conferenza del prof. Guglielmo RIGHINI, sul tema: « Radio astronomia solare ».

SEZIONE DI NAPOLI (Via Mezzocannone, 16).

3 marzo 1961 - ore 18,15 — Conferenza del per. ind. Mario FERRARIO, sul tema: « La manutenzione delle linee elettriche in tensione ».

21 aprile 1961 - ore 17,30 in prima convocazione e ore 18,15 in seconda convocazione: Assemblea ordinaria dei Soci.

SEZIONE DI ROMA (Via Giolitti, 34).

13 aprile 1961 - ore 18,30 — Conferenza del prof. Rigo RIGHI, sul tema: « La teoria algebrica degli automatismi a sequenze ».

27 aprile 1961 - ore 18,30 — Conferenza del dr. ing. Franco UCCELLI, sul tema: « Programmatori a controllo numerico nell'industria ».

Prima della conferenza sono stati consegnati i seguenti premi istituiti presso la sezione stessa: « Premio Moisé Ascoli 1958 », « Premio Moisé Ascoli 1959 », « Premio Ulisse Del Buono 1960 ».

SEZIONE DI TORINO (Via Giolitti, 1).

21 marzo 1961 - ore 20,30 in prima convocazione e ore 21 in seconda convocazione: Assemblea ordinaria dei Soci. Dopo l'Assemblea sono stati proiettati i seguenti documenti: « Diga di Beauregard », « Uomo, macchine, uomo », « Elettrodo fra la Valle d'Aosta e Torino », « Un pugno di fieno ».

6 aprile - ore 21,15 — Conferenza del dr. ing. Edoardo RAVA, sul tema: « L'equilibramento dinamico degli organi rotanti ». La conferenza è stata illustrata da proiezioni e da corto-metraggi.

SEZIONE DI TRIESTE (Via Annunziata, 7).

29 marzo 1961 - ore 21 — Riunione mensile sul tema: « Satellite e telecomunicazioni ». Relatore dr. ing. Sergio NORDIO.

11 aprile 1961 - ore 19 — Conferenza del dr. ing. Ercole DE CASTRO, sul tema: « Problemi elettronici riguardanti la radioastronomia ».

SEZIONE VENETA (Via F. Marzolo, 9).

1^o marzo 1961 - ore 18 — Conferenza del dr. ing. Renzo ROVA, sul tema: « Criteri generali per il dimensionamento degli impianti di terra ».

15 marzo 1961 - ore 17,15 in prima convocazione e ore 17,30 in seconda convocazione: Assemblea generale dei Soci. Successivamente è stata tenuta dal dr. ing. Giovanni FRATE, una conferenza sul tema: « Guasto evolutivo e guasto chilometrico, particolari sollecitazioni degli interruttori ».

12 aprile 1961 - ore 18 — Conferenza del dr. ing. Giovanni PARIGI, sul tema: « I semiconduttori nei gruppi raddrizzatori di potenza ». La conferenza è stata illustrata da proiezioni.